



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

TUGAS AKHIR - TE 141599

**ANALISIS KESTABILAN TRANSIEN DAN MEKANISME
PELEPASAN BEBAN DI PT. PERTAMINA RU V BALIKPAPAN
AKIBAT PENAMBAHAN GENERATOR 2x15MW DAN
PENAMBAHAN BEBAN 25 MW**

Yudiestira
NRP 2212 100 133

Dosen Pembimbing
Dr. Ir. Margo Pujiantara, MT.
Dr. Eng. Ardyono Priyadi, ST., M.Eng.

JURUSAN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2016



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

FINAL PROJECT - TE 141599

**Transient Stability Analysis and Load Shedding
Mechanism at the Pertamina RU V. Balikpapan Company
due to Integration New 2x15 MW Generators and New
25 MW Load**

Yudiestira
NRP 2212 100 133

Advisor
Dr. Ir. Margo Pujiantara, MT.
Dr. Eng. Ardyono Priyadi, ST., M.Eng.

DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING
Faculty of Industrial Technology
Sepuluh Nopember Institute of Technology
Surabaya 2016

**ANALISIS KESTABILAN TRANSIEN DAN
MEKANISME PELEPASAN BEBAN DI PT.
PERTAMINA RU V BALIKPAPAN AKIBAT
PENAMBAHAN GENERATOR 2x15MW DAN
PENAMBAHAN BEBAN 25 MW**

TUGAS AKHIR

**Diajukan untuk Memenuhi Sebagian Persyaratan
Untuk Memeroleh Gelar Sarjana Teknik
Pada**

**Bidang Teknik Sistem Tenaga
Jurusan Teknik Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember**

Menyetujui:

Dosen Pembimbing I

Dr. Ir. Margo Pujiatara, MT.
NIP 19660313 199011 001

Dosen Pembimbing II

Dr. Eng. Ardyono Priyadi, ST., M.Eng
NIP 19730927 199803 1 004



ANALISIS KESTABILAN TRANSIEN DAN MEKANISME PELEPASAN BEBAN DI PT. PERTAMINA RU V. BALIKPAPAN AKIBAT PENAMBAHAN GENERATOR 2x15 MW DAN PENAMBAHAN BEBAN 25 MW

Nama : Yudiestira
Dosen Pembimbing 1 : Dr. Ir. Margo Pujiantara, M.T.
Dosen Pembimbing 2 : Dr. Eng. Ardyono Priyadi, S.T., M.Eng.

ABSTRAK

PT. PERTAMINA RU V Balikpapan merupakan pemasok BBM kedua terbesar setelah RU IV Cilacap. Peningkatan kebutuhan konsumen akan BBM membuat PT. PERTAMINA RU V. Balikpapan melakukan penambahan pabrik baru. Maka untuk menjaga kontinuitas sistem kelistrikan yang ada diperlukan penambahan 2 unit pembangkit baru, pada mulanya ada 6 unit pembangkit STG yang beroperasi menjadi 8 unit pembangkit. Akibat penambahan pabrik baru ini, kestabilan transien pada plant belum dianalisis secara mendalam, sehingga perlu dilakukan studi stabilitas transien untuk mengetahui keandalan sistem saat terjadi gangguan transien. Pada tugas akhir ini akan dilakukan analisis kestabilan transien akibat generator lepas, *motor starting*, dan hubung singkat kemudian akan dilakukan perancangan *load shedding* agar sistem mampu mempertahankan kestabilannya dan kontinuitas aliran daya tetap terjaga. Software yang digunakan dalam menganalisis fenomena kestabilan transien ini yaitu ETAP 12.6. Hasil simulasi menunjukkan bahwa lepasnya satu generator ketika 8 generator ON tidak memerlukan adanya skema *load shedding*, sedangkan lepasnya dua generator ketika 6 generator ON memerlukan adanya *load shedding* hingga tahap ketiga. Mekanisme *load shedding* yang dilakukan menggunakan standar frekuensi. Saat kasus hubung singkat, sistem masih stabil namun tegangan sistem turun pada beberapa bus. Selain itu, kasus *motor starting* masih diperbolehkan saat 8 generator ON karena tidak memberikan efek yang signifikan pada respon tegangan, frekuensi, dan sudut rotor pada sistem

Kata Kunci: Gangguan Transien, Kestabilan Transien, Pelepasan Beban.



Halaman ini sengaja dikosongkan

TRANSIENT STABILITY ANALYSIS AND LOAD SHEDDING MECHANISM AT THE PERTAMINA RU V. BALIKPAPAN COMPANY DUE TO INTEGRATION NEW 2x15 MW GENERATORS AND NEW 25 MW LOAD

Yudiestira
2212100133

1st Advisor
2nd Advisor

: Dr. Ir. Margo Pujiantara, M.T.
: Dr. Eng. Ardyono Priyadi, S.T., M.Eng.

ABSTRACT

PT. PERTAMINA RU V Balikpapan is the second largest fuel oil supplier in Indonesia after PT. PERTAMINA RU IV Cilacap. An increase in fuel oil demand causes PT. PERTAMINA RU V Balikpapan to instal a new plant. Hence, in order to maintain the continuity of esbtablished electrical systems, it is necessary to instal 2 new generator units, there are 6 operated generator STG units and after the installation there will be 8 generator units. In the other hand because of the new plant installation, studies of the transient stability have not been deeply analyzed, therby studying transient stability is necessary to determine the reliability of the system during transient disturbance. In this final project, the analyses focused on the transient stability as a result of generator outage, motor starting, and short circuit. Then, there will also be a load shedding design. Software which is being used to analyze the transient stability phenomenon is ETAP 12.6. Simulation results show that one generator outage will not need load shedding scheme when 8 generators are ON. Whereas, two generator outages need until the third load shedding scheme when 6 generators are ON. Load shedding mechanisms used are based on frequency standard. When short circuit occured, system is still stable but the system voltages decrease in several bus. Besides, motor starting cases are still allowed when 8 generators are ON because it will not give signifiant effects on voltage response, frequency, and rotor angel at the system.

Key Words: Transient Disturbances, Transient stability, Load shedding.



Halaman ini sengaja dikosongkan

KATA PENGANTAR

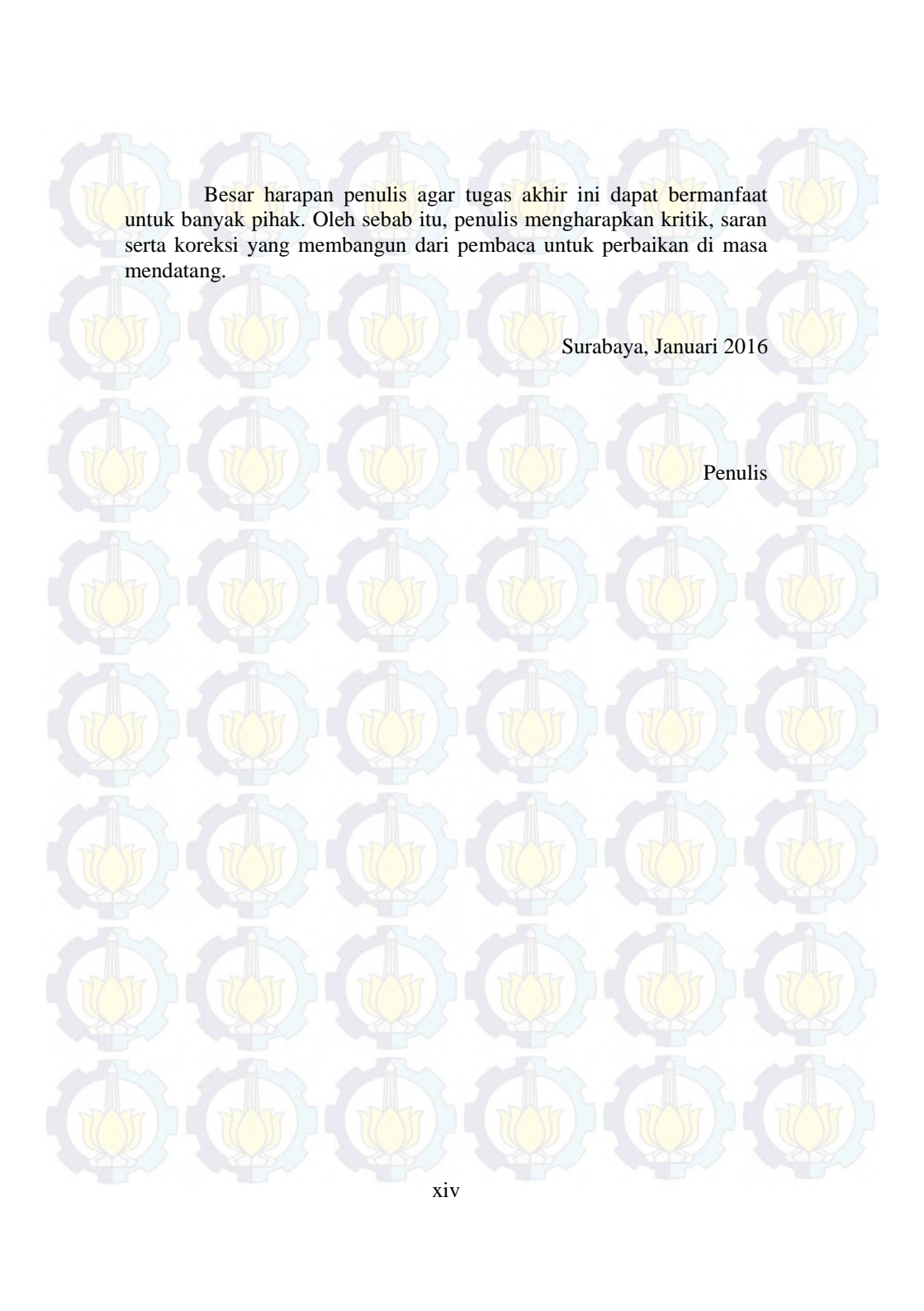
Alhamdulillah Robbil 'Alamin, segala puji bagi Allah SWT atas limpahan rahmat dan karunianya sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir yang berjudul :

ANALISIS KESTABILAN TRANSIEN DAN MEKANISME PELEPASAN BEBAN DI PT PERTAMINA RU V. BALIKPAPAN AKIBAT PENAMBAHAN GENERATOR 2x15 MW DAN PENAMBAHAN BEBAN 25 MW

Adapun tujuan dari penyusunan tugas akhir ini adalah sebagai salah satu persyaratan untuk menyelesaikan studi tahap sarjana pada bidang studi Teknik Sistem Tenaga, Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.

Dalam kesempatan ini penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada pihak-pihak yang telah banyak berjasa terutama dalam penyusunan tugas akhir ini, antara lain :

1. Segenap keluarga tercinta, Romo (Agus Riyanto), Mama (Martini Marja), dan Kakak (Jens Agustien), serta Hanna Sucita Taurina yang selalu memberi dukungan, semangat serta doa yang tiada henti untuk keberhasilan penulis.
2. Bapak Dr. Ir. Margo Pujiantara, MT dan Bapak Dr. Eng. Ardyono Priyadi, ST., M.Eng. selaku dosen pembimbing yang telah banyak memberikan saran dan bimbingan dalam penyusunan tugas akhir ini.
3. Seluruh rekan dan warga LIPIST B-204 atas bantuan, dukungan, kebersamaan dan kerja samanya selama ini.
4. Seluruh rekan Hai, Adhika, Adit Bandung, Desput, Aditya Rizaldi, Anton, Benaverd, Daldi, Iqbal, Dwiyani, Alwi, Hadyan, Osa, Bani, Jalal, Kukuh, Vidi, Oya, Arindra, Nugi, Putriisa, Igun, Wisnu, Yudha, Salman, Katil yang telah memberikan bantuan dan dukungan selama ini.
5. Seluruh keluarga besar Teknik Elektro ITS, sahabat-sahabat E-52 (2012), para dosen, karyawan, serta seluruh mahasiswa atas dukungan, masukan serta kerjasamanya sepanjang masa perkuliahan dan pengerjaan tugas akhir ini.



Besar harapan penulis agar tugas akhir ini dapat bermanfaat untuk banyak pihak. Oleh sebab itu, penulis mengharapkan kritik, saran serta koreksi yang membangun dari pembaca untuk perbaikan di masa mendatang.

Surabaya, Januari 2016

Penulis

DAFTAR ISI

	HALAMAN
JUDUL	
LEMBAR PERNYATAAN	
LEMBAR PENGESAHAN	
ABSTRAK	ix
ABSTRACT	xi
KATA PENGANTAR	xiii
DAFTAR ISI	xv
DAFTAR GAMBAR	xix
DAFTAR TABEL	xxv
 BAB 1 PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang Masalah	1
1.2 Permasalahan	1
1.3 Tujuan	2
1.4 Metodologi	2
1.5 Sistematika	4
1.6 Relevansi	5
 BAB 2 DASAR TEORI	
2.1 Kestabilan Sistem	7
2.2 Klasifikasi Kestabilan	8
2.2.1 Kestabilan Frekuensi	8
2.2.2 Kestabilan Sudut Rotor	9
2.2.3 Kestabilan Tegangan	12
2.2.3.1 Kestabilan Tegangan Gangguan Besar	13
2.2.3.2 Kestabilan Tegangan Gangguan Kecil	13
2.2.3.3 Kestabilan Tegangan Jangka Pendek	13
2.2.3.4 Kestabilan Tegangan Jangka Panjang	14
2.3 Kestabilan Transien	14
2.3.1 Hubungan Singkat (<i>Short Circuit</i>)	15
2.3.2 <i>Motor Starting</i>	15
2.3.3 Penambahan Beban secara Tiba-Tiba	17
2.4 Dinamika Rotor dan Persamaan Ayunan	15
2.5 Pengaturan Frekuensi	22
2.5.1 <i>Mode Droop</i>	23

2.5.2 Mode Isochronous.....	23
2.6 Load Shedding (Pelepasan Beban)	23
2.6.1 Pelepasan Beban secara Manual	25
2.6.2 Pelepasan Beban secara Otomatis.....	25
2.7 Standar yang Digunakan untuk Analisis Kestabilan Transien.....	25
2.7.1 Standar Kemampuan Frekuensi Abnormal Turbin Uap.....	25
2.7.2 Standar Tegangan	27
2.7.3 Standar Pelepasan Beban	28

BAB 3 SISTEM KELISTRIKAN PT. PERTAMINA RU V BALIKPAPAN

3.1 Sistem Kelistrikan di PT. Pertamina RU V Balikpapan	31
3.2 Data Kelistrikan PT. Pertamina RU V Balikpapan.....	33
3.2.1 Kapasitas Pembangkitan PT. Pertamina RU V Balikpapan.....	33
3.2.2 Sistem Distribusi PT. Pertamina RU V Balikpapan	34
3.2.3 Motor Tebesar PT. Pertamina RU V Balikpapan	35

BAB 4 SIMULASI DAN ANALISIS KESTABILAN TRANSIEN DI PT. PERTAMINA RU V BALIKPAPAN

4.1 Pemodelan Sistem Kelistrikan.....	37
4.2 Studi Kasus Kestabilan Transien.....	37
4.3 Hasil Simulasi Kestabilan Transien, Mekanisme Load Shedding	40
4.3.1 Simulasi Kestabilan Transien Generator Outage.....	40
4.3.1.1 Studi Kasus STG 1-5 OFF: Generator STG 1-5A Outage dari Sistem (t=2s).....	40
4.3.1.2 Studi Kasus STG 2-1 OFF: Generator STG 2-1 Outage dari Sistem (t=2s)	43
4.3.1.3 Studi Kasus STG 1-5A + 1-6 OFF: Generator STG 1-5A + 1-6 Outage dari Sistem (t=2s)	46
4.3.1.4 Studi Kasus STG 1-5A + 1-6 OFF: Generator STG 1-5A + 1-6 Outage dari Sistem (t=2s) dengan Load Shedding.....	48
4.3.1.5 Studi Kasus STG 2-1A + 2-2 OFF: Generator STG 2-1 + 2-2 Outage dari Sistem (t=2s)	52
4.3.1.6 Studi Kasus STG 2-1A + 2-2 OFF: Generator STG 2-1 + 2-2 Outage dari Sistem (t=2s) dengan Load Shedding.....	54

4.3.1.7	Studi Kasus STG 1-6 + 2-1 OFF: Generator STG 1-6 + 2-1 <i>Outage</i> dari Sistem ($t=2s$)	57
4.3.1.8	Studi Kasus STG 1-6 + 2-1 OFF: Generator STG 1-6 + 2-1 <i>Outage</i> dari Sistem ($t=2s$) dengan <i>Load Shedding</i>	60
4.3.1.9	Studi Kasus New 1 + 1-5A OFF: Generator New 1 + 1-5A <i>Outage</i> dari Sistem ($t=2s$)	64
4.3.1.10	Studi Kasus New 1 + 1-5A OFF: Generator New 1 + 1-5A <i>Outage</i> dari Sistem ($t=2s$) dengan <i>Load Shedding</i> 1	67
4.3.1.11	Studi Kasus New 1 + 1-5A OFF: Generator New 1 + 1-5A <i>Outage</i> dari Sistem ($t=2s$) dengan <i>Load Shedding</i> 2	70
4.3.1.12	Studi Kasus New 2 + 2-1 OFF: Generator New 2 + 2-1 <i>Outage</i> dari Sistem ($t=2s$)	73
4.3.1.13	Studi Kasus New 2 + 2-1 OFF: Generator New 2 + 2-1 <i>Outage</i> dari Sistem ($t=2s$) dengan <i>Load Shedding</i> 1	75
4.3.1.14	Studi Kasus New 2 + 2-1 OFF: Generator New 2 + 2-1 <i>Outage</i> dari Sistem ($t=2s$) dengan <i>Load Shedding</i> 2	79
4.3.1.15	Studi Kasus New 1 +New 2: Generator New 1 + New 2 dari Sistem ($t=2s$)	82
4.3.1.16	Studi Kasus New 1 +New 2: Generator New 1 + New 2 dari Sistem ($t=2s$) dengan <i>Load Shedding</i> 1	85
4.3.1.17	Studi Kasus New 1 +New 2: Generator New 1 +New 2 dari Sistem ($t=2s$) dengan <i>Load</i> <i>Shedding</i> 2	88
4.3.1.18	Studi Kasus New 1 +New 2: Generator New 1 +New 2 dari Sistem ($t=2s$) dengan <i>Load</i> <i>Shedding</i> 3	91
4.3.2	Simulasi Kestabilan Transien <i>Short Circuit</i>	94
4.3.2.1	Studi Kasus <i>SC</i> 0,38 kV: Gangguan Hubung Singkat 3 fasa di Bus 0,38kV ($t=2 s$)	94
4.3.2.2	Studi Kasus <i>SC</i> 6,6 kV: Gangguan Hubung Singkat 3 Fasa di Bus 6,6 kV ($t=2 s$)	97

4.3.2.3	Studi Kasus <i>SC</i> 11 kV: Gangguan Hubung Singkat 3 Fasa di Bus 11 kV ($t=2$ s)	100
4.3.2.4	Studi Kasus <i>SC</i> 33 kV: Gangguan Hubung Singkat 3 Fasa di Bus 3 kV ($t=2$ s)	100
4.3.3	Simulasi Kestabilan Transien <i>Motor Starting</i>	106
4.3.3.1	Studi Kasus <i>Motor GM-3-01-C Start</i>	106
4.4	Rekapitulasi Data	109
4.4.1	Rekapitulasi Kuantitas Beban <i>Load Shedding</i> 1	109
4.4.2	Rekapitulasi Kondisi Frekuensi dan Tegangan Generator <i>Outage</i>	109
4.4.3	Rekapitulasi Kondisi Frekuensi dan Tegangan <i>Short Circuit</i>	113

BAB 5 PENUTUP

5.1	Kesimpulan	115
5.2	Saran	116

DAFTAR PUSTAKA	117
-----------------------------	-----

RIWAYAT HIDUP PENULIS	119
------------------------------------	-----

LAMPIRAN	121
-----------------------	-----

DAFTAR GAMBAR

HALAMAN

Gambar 1.1	Diagram Alir Metodologi Pelaksanaan Studi.....	4
Gambar 2.1	Klasifikasi Kestabilan Sistem Tenaga.....	8
Gambar 2.2	Diagram Impedansi Sistem Dua Mesin.....	10
Gambar 2.3	Model Ideal Sistem Dua Mesin.....	11
Gambar 2.4	Diagram Fasor Sistem Dua Mesin	12
Gambar 2.5	Respon Sudut Rotor terhadap Gangguan Transien	16
Gambar 2.6	Representasi Suatu Rotor Mesin yang Membandingkan Arah Putaran serta Momen Putar Mekanis dan Elektris untuk Generator (a) dan Motor (b)	18
Gambar 2.7	Blok Diagram Konsep Dasar <i>Speed Governing</i>	22
Gambar 2.8	Perubahan Frekuensi sebagai Fungsi Waktu dengan Adanya Pelepasan Beban	23
Gambar 2.9	Standar Frekuensi untuk <i>Steam Turbin Generator</i> (IEEE Std C37. 106-2003)	26
Gambar 2.10	Definisi <i>Voltage Magnitude Event</i> berdasarkan Standar IEEE 1195-1995	27
Gambar 3.1	Sistem Kelistrikan PT. Pertamina RU V Balikpapan tanpa Penambahan Beban	32
Gambar 3.2	Sistem Kelistrikan PT. Pertamina RU V Balikpapan tanpa Penambahan Beban	32
Gambar 3.3	Karakteristik Motor GM-3-01C	36
Gambar 4.1	Respon Frekuensi Saat Generator STG-1-5A <i>Outage</i> dari Sistem	41
Gambar 4.2	Respon Tegangan Saat Generator STG-1-5A <i>Outage</i> dari Sistem	41
Gambar 4.3	Respon Sudut Rotor Saat Generator STG-1-5A <i>Outage</i> dari Sistem.....	42
Gambar 4.4	Respon Frekuensi Saat Generator STG-2-1 <i>Outage</i> dari Sistem	43
Gambar 4.5	Respon Tegangan Saat Generator STG-2-1 <i>Outage</i> dari Sistem	44
Gambar 4.6	Respon Sudut Rotor Saat Generator STG-2-1 <i>Outage</i> dari Sistem	45
Gambar 4.7	Respon Frekuensi Saat Generator STG 1-5A dan STG 1-6 <i>Outage</i> dari Sistem	46

Gambar 4.8	Respon Tegangan Saat Generator STG 1-5A dan STG 1-6 <i>Outage</i> dari Sistem.....	47
Gambar 4.9	Respon Sudut Rotor Saat Generator STG 1-5A dan STG 1-6 <i>Outage</i> dari Sistem.....	47
Gambar 4.10	Respon Frekuensi Saat Generator STG 1-5A dan STG 1-6 <i>Outage</i> dari Sistem dengan Mekanisme <i>Load Shedding</i> Tahap 1	49
Gambar 4.11	Respon Tegangan Saat Generator STG 1-5A dan STG 1-6 <i>Outage</i> dari Sistem dengan Mekanisme <i>Load Shedding</i> Tahap 1	50
Gambar 4.12	Respon Sudut Rotor Saat Generator STG 1-5A dan STG 1-6 <i>Outage</i> dari Sistem dengan Mekanisme <i>Load Shedding</i> Tahap 1	51
Gambar 4.13	Respon Frekuensi Saat Generator STG 2-1 dan STG 2-2 <i>Outage</i> dari Sistem	52
Gambar 4.14	Respon Saat Generator STG 2-1 dan STG 2-2 <i>Outage</i> dari Sistem	53
Gambar 4.15	Respon Sudut Rotor Saat Generator STG 2-1 dan STG 2-2 <i>Outage</i> dari Sistem.....	53
Gambar 4.16	Respon Frekuensi Saat Generator STG 2-1 dan STG 2-2 <i>Outage</i> dari Sistem dengan Mekanisme <i>Load Shedding</i> Tahap 1	55
Gambar 4.17	Respon Tegangan Saat Generator STG 2-1 dan STG 2-2 <i>Outage</i> dari Sistem dengan Mekanisme <i>Load Shedding</i> Tahap 1	56
Gambar 4.18	Respon Sudut Rotor Saat Generator STG 2-1 dan STG 2-2 <i>Outage</i> dari Sistem dengan Mekanisme <i>Load Shedding</i> Tahap 1	56
Gambar 4.19	Respon Frekuensi Saat Generator STG 1-6 dan STG 2-1 <i>Outage</i> dari Sistem	58
Gambar 4.20	Respon Tegangan Saat Generator STG 1-6 dan STG 2-1 <i>Outage</i> dari Sistem.	59
Gambar 4.21	Respon Sudut Rotor Saat Generator STG 1-6 dan STG 2-1 <i>Outage</i> dari Sistem.....	59
Gambar 4.22	Respon Frekuensi Saat Generator STG 1-6 dan STG 2-1 <i>Outage</i> dari Sistem dengan Mekanisme <i>Load Shedding</i> Tahap 1	61

Gambar 4.23	Respon Tegangan Saat Generator STG 1-6 dan STG 2-1 <i>Outage</i> dari Sistem dengan Mekanisme <i>Load Shedding</i> Tahap 1.....	62
Gambar 4.24	Respon Sudut Rotor Saat Generator STG 1-6 dan STG 2-1 <i>Outage</i> dari Sistem dengan Mekanisme <i>Load Shedding</i> Tahap 1.....	63
Gambar 4.25	Respon Frekuensi Saat Generator STG New 1 dan STG 1-5A <i>Outage</i> dari Sistem	64
Gambar 4.26	Respon Tegangan Saat Generator STG New 1 dan STG 1-5A <i>Outage</i> dari Sistem	65
Gambar 4.27	Respon Sudut Rotor Saat Generator STG New 1 dan STG 1-5A <i>Outage</i> dari Sistem	66
Gambar 4.28	Respon Frekuensi Generator STG New 1 dan STG 1-5A <i>Outage</i> dari Sistem dengan Mekanisme <i>Load Shedding</i> Tahap 1.....	67
Gambar 4.29	Respon Tegangan Generator STG New 1 dan STG 1-5A <i>Outage</i> dari Sistem dengan Mekanisme <i>Load Shedding</i> Tahap 1	68
Gambar 4.30	Respon Sudut Rotor Generator STG New 1 dan STG 1-5A <i>Outage</i> dari Sistem dengan Mekanisme <i>Load Shedding</i> Tahap 1.....	69
Gambar 4.31	Respon Frekuensi Saat Generator STG New 1 dan STG 1-5A <i>Outage</i> dari Sistem dengan Mekanisme <i>Load Shedding</i> Tahap 2.....	70
Gambar 4.32	Respon Tegangan Saat Generator STG New 1 dan STG 1-5A <i>Outage</i> dari Sistem dengan Mekanisme <i>Load Shedding</i> Tahap 2.....	71
Gambar 4.33	Respon Sudut Rotor Saat Generator STG New 1 dan STG 1-5A <i>Outage</i> dari Sistem dengan Mekanisme <i>Load Shedding</i> Tahap 2.....	72
Gambar 4.34	Respon Frekuensi Saat Generator STG New 2 dan STG 2-1 <i>Outage</i> dari Sistem.....	73
Gambar 4.35	Respon Tegangan Saat Generator STG New 2 dan STG 2-1 <i>Outage</i> dari Sistem.....	74
Gambar 4.36	Respon Sudut Rotor Saat Generator STG New 2 dan STG 2-1 <i>Outage</i> dari Sistem.....	75
Gambar 4.37	Respon Frekuensi Saat Generator STG New 2 dan STG 2-1 <i>Outage</i> dari Sistem dengan Mekanisme <i>Load Shedding</i> Tahap 1.....	76

Gambar 4.38	Respon Tegangan Generator STG New 2 dan STG 2-1 <i>Outage</i> dari Sistem dengan Mekanisme <i>Load Shedding</i> Tahap 1	77
Gambar 4.39	Respon Sudut Rotor Generator STG New 2 dan STG 2-1 <i>Outage</i> dari Sistem dengan Mekanisme <i>Load Shedding</i> Tahap 1	78
Gambar 4.40	Respon Frekuensi Saat Generator STG New 2 dan STG 2-1 <i>Outage</i> dari Sistem dengan Mekanisme <i>Load Shedding</i> Tahap 2	79
Gambar 4.41	Respon Tegangan Generator STG New 2 dan STG 2-1 <i>Outage</i> dari Sistem dengan Mekanisme <i>Load Shedding</i> Tahap 2	80
Gambar 4.42	Respon Sudut Rotor Generator STG New 2 dan STG 2-1 <i>Outage</i> dari Sistem dengan Mekanisme <i>Load Shedding</i> Tahap 2	81
Gambar 4.43	Respon Frekuensi Saat Generator STG New 1 dan Generator STG New 2 <i>Outage</i> dari Sistem.....	82
Gambar 4.44	Respon Tegangan Saat Generator STG New 1 dan Generator STG New 2 <i>Outage</i> dari Sistem.....	83
Gambar 4.45	Respon Sudut Rotor Saat Generator STG New 1 dan Generator STG New 2 <i>Outage</i> dari Sistem.....	84
Gambar 4.46	Respon Frekuensi Saat Generator STG New 1 dan Generator STG New 2 <i>Outage</i> dari Sistem dengan Mekanisme <i>Load Shedding</i> Tahap 1	85
Gambar 4.47	Respon Tegangan Generator STG New 1 dan Generator STG New 2 <i>Outage</i> dari Sistem dengan Mekanisme <i>Load Shedding</i> Tahap 1	86
Gambar 4.48	Respon Sudut Rotor Generator STG New 1 dan Generator STG New 2 <i>Outage</i> dari Sistem dengan Mekanisme <i>Load Shedding</i> Tahap 1	87
Gambar 4.49	Respon Frekuensi Saat Generator STG New 1 dan Generator STG New 2 <i>Outage</i> dari Sistem dengan Mekanisme <i>Load Shedding</i> Tahap 2.....	88
Gambar 4.50	Respon Tegangan Generator STG New 1 dan Generator STG New 2 <i>Outage</i> dari Sistem dengan Mekanisme <i>Load Shedding</i> Tahap 2.....	89
Gambar 4.51	Respon Sudut Rotor Generator STG New 1 dan Generator STG New 2 <i>Outage</i> dari Sistem dengan Mekanisme <i>Load Shedding</i> Tahap 2.....	90

Gambar 4.52	Respon Frekuensi Saat Generator STG New 1 dan Generator STG New 2 <i>Outage</i> dari Sistem dengan Mekanisme <i>Load Shedding</i> Tahap 3	91
Gambar 4.53	Respon Tegangan Generator STG New 1 dan Generator STG New 2 <i>Outage</i> dari Sistem dengan Mekanisme <i>Load Shedding</i> Tahap 3	92
Gambar 4.54	Respon Sudut Rotor Generator STG New 1 dan Generator STG New 2 <i>Outage</i> dari Sistem dengan Mekanisme <i>Load Shedding</i> Tahap 3	93
Gambar 4.55	Respon Frekuensi Saat Terjadi Gangguan Hubung Singkat di Bus SS69MA	94
Gambar 4.56	Respon Tegangan Saat Terjadi Gangguan Hubung Singkat di Bus SS69MA	95
Gambar 4.57	Respon Sudut Rotor Saat Terjadi Gangguan Hubung Singkat di Bus SS69MA	96
Gambar 4.58	Respon Frekuensi Saat Terjadi Gangguan Hubung Singkat di Bus 1AL-B	97
Gambar 4.59	Respon Tegangan Saat Terjadi Gangguan Hubung Singkat di Bus 1AL-B	98
Gambar 4.60	Respon Sudut Rotor Saat Terjadi Gangguan Hubung Singkat di Bus 1AL-B	99
Gambar 4.61	Respon Frekuensi Saat Terjadi Gangguan Hubung Singkat di Bus Bus63	100
Gambar 4.62	Respon Tegangan Saat Terjadi Gangguan Hubung Singkat di Bus Bus63	101
Gambar 4.63	Respon Sudut Rotor Saat Terjadi Gangguan Hubung Singkat di Bus Bus63	102
Gambar 4.64	Respon Frekuensi Saat Terjadi Gangguan Hubung Singkat di Bus Bus63	103
Gambar 4.65	Respon Tegangan Saat Terjadi Gangguan Hubung Singkat di Bus Bus63	104
Gambar 4.66	Respon Sudut Rotor Saat Terjadi Gangguan Hubung Singkat di Bus Bus63	105
Gambar 4.67	Respon Frekuensi Saat <i>Starting</i> Motor GM-3-01-C..	106
Gambar 4.68	Respon Tegangan Saat <i>Starting</i> Motor GM-3-01-C .	107
Gambar 4.69	Respon Sudut Rotor Saat <i>Starting</i> Motor GM-3-01-C-105	107



Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Skema Pelepasan Beban Tiga Langkah	28
Tabel 2.2	Skema Pelepasan Beban Enam Langkah	28
Tabel 2.3	Skema Pelepasan Beban Tiga Langkah Sistem 60 Hz dan 50 Hz.....	29
Tabel 3.1	Jumlah Total Pembangkitan, Pembebanan, dan <i>Demand</i>	33
Tabel 3.2	Data Pembangkit	33
Tabel 3.3	Data Transformator Distribusi di PT. Pertamina RU V Balikpapan	34
Tabel 3.4	Data <i>Tie-Transformator</i> Distribusi di PT. Pertamina RU V Balikpapan	35
Tabel 3.5	Data Spesifikasi Motor GM-3-01C	35
Tabel 4.1	Studi Kasus Kestabilan Transien.....	38
Tabel 4.2	Rekapitulasi Kuantitas Beban <i>Load Shedding</i> Tahap 1	108
Tabel 4.3	Rekapitulasi Kuantitas Beban <i>Load Shedding</i> Tahap 2	108
Tabel 4.4	Rekapitulasi Kuantitas Beban <i>Load Shedding</i> Tahap 3	108
Tabel 4.5	Rekapitulasi Frekuensi dan Tegangan Generator <i>Outage</i>	108
Tabel 4.6	Rekapitulasi Frekuensi dan Tegangan <i>Short Circuit</i>	113
Tabel 4.7	Rekapitulasi Frekuensi dan Tegangan Motor Starting..	113



Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang Masalah

Perkembangan sistem tenaga listrik baik pada beban maupun generator akan menimbulkan masalah-masalah baru yang menyangkut tentang masalah kestabilan sistem. Dalam suatu sistem atau *plant* yang besar, lebih dari dua generator yang bekerja secara bersamaan, kerugian besar mungkin dapat terjadi jika kontinuitas daya tidak stabil[1]. Suatu sistem akan mencapai kestabilan ketika daya mekanik pada penggerak utama generator (*prime mover*) seimbang dengan daya elektrik yang disalurkan ke beban. Kestabilan sistem tenaga listrik dikategorikan menjadi tiga, yaitu kestabilan frekuensi, sudut rotor, dan tegangan[2].

Pada saat terjadi perubahan di suatu sistem, seperti pada *generator outage*, *motor starting*, dan gangguan hubung singkat. Jika gangguan yang terjadi bernilai besar dan terjadi secara tiba-tiba dan dalam waktu cepat maka masalah kestabilan transien dalam suatu sistem kelistrikan harus diperhatikan[3]. Jika gangguan tidak dihilangkan dalam kurung waktu tertentu, maka hal ini akan menyebabkan generator kehilangan sinkronisasi dengan sistem[3]. Batasan maksimal waktu tersebut tergantung pada *plant* yang digunakan, tidak ada standarisasi secara umum. Jadi dapat disimpulkan bahwa parameter utama dalam kestabilan suatu sistem tenaga listrik adalah sebagai berikut[3]:

1. Ukuran dari gangguan.
2. Rentang waktu saat gangguan berlangsung.
3. Parameter sistem yang paling berpengaruh.
4. Pemodelan yang tepat dan analisis gangguan yang spesifik.

Pada kasus tertentu dibutuhkan suatu rancangan dari mekanisme pelepasan beban tertentu saat terjadi gangguan yang berkaitan dengan kestabilan transien. Hal ini bertujuan untuk membuat sistem kembali stabil dan gangguan-gangguan tersebut tidak merusak peralatan-peralatan yang ada di sistem.

Gangguan Transien dapat mempengaruhi stabilitas dari suatu sistem tenaga listrik khususnya pada industri-industri besar, sehingga dibutuhkan studi lebih lanjut untuk menganalisisnya. Setelah dilakukan penambahan Generator dan penambahan beban, PT. Pertamina RU V Balikpapan belum melakukan studi transien yang lebih mendalam. Sehingga dibutuhkan studi stabilitas transien untuk mengetahui

kestabilan sistem saat terjadi gangguan transien. Berdasarkan paper referensi *Definition and Classification of Power System Stability*, maka pada tugas akhir ini analisis yang dilakukan meliputi kestabilan frekuensi, sudut rotor, dan tegangan[4]. Sedangkan perubahan yang akan terjadi pada sistem meliputi generator lepas, motor starting, dan hubung singkat. Pada tugas akhir ini juga akan dianalisis mekanisme pelepasan beban untuk mengatasi gangguan transien yang terjadi.

1.2 Permasalahan

Permasalahan yang dibahas dalam tugas akhir ini adalah:

1. Bagaimana pola operasi sistem kelistrikan di PT. Pertamina RU V Balikpapan setelah penambahan beban dan generator?
2. Bagaimana respon frekuensi, tegangan, dan sudut rotor ketika terjadi gangguan?
3. Bagaimana cara merancang pola mekanisme pelepasan beban (*load shedding*) yang handal di PT. Pertamina RU V Balikpapan?

1.3 Tujuan

Tugas akhir ini memiliki beberapa tujuan sebagai berikut:

1. Mengetahui bagaimana pola operasi sistem kelistrikan di PT. Pertamina RU V Balikpapan setelah penambahan beban dan generator.
2. Melakukan simulasi dan analisa transien respon frekuensi, tegangan, serta respon sudut rotor.
3. Mendapatkan pola mekanisme pelepasan beban (*Load shedding*) yang handal agar sistem kelistrikan dapat mempertahankan kestabilannya pada saat terjadi gangguan.

1.4 Metodologi

Metode Penelitian yang digunakan pada tugas akhir ini adalah sebagai berikut :

1. Pengumpulan Data
Mengumpulkan data – data generator dan pembebanan baru dari sistem kelistrikan PT. Pertamina RU V Balikpapan,

seperti *single line diagram*, spesifikasi generator (governor dan eksiter), rating kabel, transformator, motor listrik, bus, dan pola operasinya.

2. Permodelan Sistem

Memodelkan sistem kelistrikan PT. Pertamina RU V Balikpapan yang telah terintegrasi dengan Generator dan beban baru. Permodelan ini dilakukan agar dapat melakukan analisis *Power Flow* dan *Transient Stability*.

3. Simulasi dan Analisis Power Flow

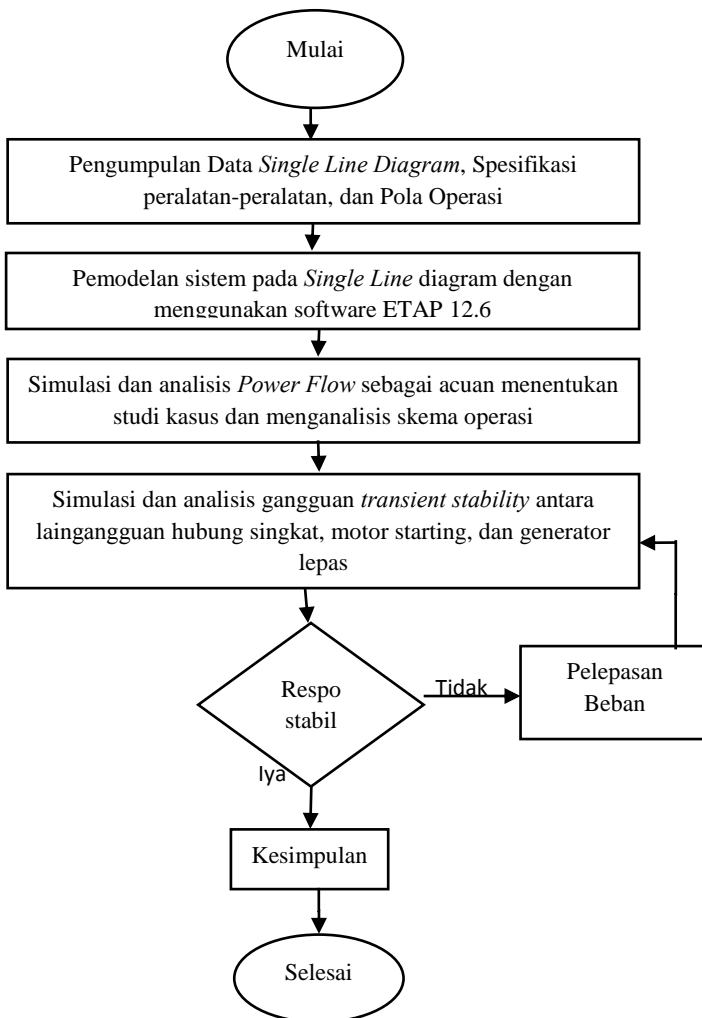
Simulasi yang dilakukan pertama kali adalah simulasi aliran daya(Power Flow). Dari simulasi ini akan didapatkan profil tegangan tiap bus dan aliran daya pada tiap saluran yang kemudian akan dijadikan acuan untuk analisis kestabilan transien.

4. Simulasi, analisis Kestabilan Transien, dan evaluasi *load shedding existing*

Dari simulasi sistem selanjutnya akan didapatkan hasil yang akan dianalisis. Gangguan transien yang disimulasikan akan disamakan dengan Studi transien yang sebelumnya telah dilakukan sebelumnya. Dari hasil simulasi akan dapat terlihat mekanisme loadshedding yang sebelumnya masih dapat atau tidak untuk menangani gangguan transien yang terjadi ketika telah ketambahan generator dan beban baru. Jika masih, maka mekanisme *loadshedding* akan tetap digunakan. Jika tidak, maka akan direncanakan mekanisme *loadshedding* yang lebih handal sehingga sistem dapat kembali stabil saat terjadi gangguan transien.

5. Kesimpulan

Memberikan kesimpulan tentang kestabilan sistem akibat gangguan transien yang terjadi di PT. Pertamina RU V Balikpapan serta memberikan rekomendasi untuk mengatasi gangguan yang terjadi agar sistem dapat mempertahankan kestabilannya.



Gambar 1.1 Diagram Alir Metodologi Pelaksanaan Studi

1.5 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan dalam tugas akhir ini akan dibagi menjadi lima bab dengan uraian sebagai berikut:

Bab I : Pendahuluan

Bab ini membahas tentang penjelasan mengenai latar belakang, permasalahan, tujuan, metodologi, sistematika pembahasan, dan relevansi.

Bab II : Dasar Teori

Bab ini secara umum membahas teori penunjang kestabilan transien dan juga pelepasan beban.

Bab III : Sistem kelistrikan PT. Pertamina Refinery Unit

V Balikpapan setelah penambahan beban dan generator dan Setup Simulasi. Bab ini membahas profil kelistrikan, serta pembebanan pada PT. Pertamina RU V Balikpapan .

Bab IV : Simulasi dan Analisis

Bab ini membahas tentang hasil simulasi yang dilakukan, meliputi generator lepas, hubung singkat, motor starting yang di analisa pada generator dan bus, evaluasi load shedding eksisting dan juga desain *load shedding* yang baru.


Bab V : Kesimpulan

Bab ini membahas tentang kesimpulan dan saran dari hasil pembahasan yang telah diperoleh.

1.6 Relevansi

Hasil yang diperoleh dari tugas akhir ini diharapkan memberi manfaat sebagai berikut:

1. Sebagai acuan dasar pada saat mengoperasikan sistem kelistrikan PT. Pertamina Refinery Unit V Balikpapan yang baru agar sistem berjalan aman dan stabil.
2. Digunakan sebagai acuan dalam melakukan mekanisme load shedding terhadap sistem kelistrikan PT. Pertamina Refinery Unit V Balikpapan yang baru.
3. Dapat dijadikan referensi pada penelitian selanjutnya tentang stabilitas transien pada sistem kelistrikan di industri.



Halaman Ini Sengaja Dikosongkan

BAB 2

KESTABILAN TRANSIEN

2.1 Kestabilan Sistem

Kestabilan sistem tenaga listrik secara umum dapat didefinisikan sebagai kemampuan dari suatu sistem tenaga listrik untuk mempertahankan keadaan sinkronnya pada saat dan sesudah terjadi gangguan. Definisi ini berlaku juga untuk sistem yang beroperasi dengan menginterkoneksi beberapa generator (*multimachine*)[2]. Sistem dikatakan stabil ketika adanya keseimbangan antara daya mekanik pada prime mover dengan daya elektriks yang disalurkan ke beban. Sistem tenaga listrik yang kompleks memiliki banyak beban-beban dinamis yang besar daya yang diserapnya sangat variasi dalam rentang waktu tertentu, dengan adanya perubahan ini pasokan daya yang disalurkan oleh generator harus sesuai dengan kebutuhan bebannya. Apabila sistem mengalami kelebihan daya elektrik maka akan terjadi perlambatan pada rotor generator, hal ini disebabkan semakin terbebannya generator. Namun kelebihan daya mekanik akan terjadi percepatan rotor generator, hal ini disebabkan semakin ringan beban yang ditanggung generator. Apabila kedua kondisi ini tidak dihilangkan dengan segera, maka percepatan dan perlambatan putaran motor akan mengakibatkan hilangnya sinkronisasi dalam sistem. Maka dibutuhkan analisis kestabilan agar generator yang terganggu tidak lepas dari sistem dan menyebabkan kerusakan sistem menjadi semakin meluas.

Usaha untuk mengembalikan sistem menjadi kondisi sinkron setelah terjadi gangguan inilah yang disebut juga sebagai periode transien. Karakteristik utama dalam stabilitas ini adalah bagaimana mesin-mesin mempertahankan sinkronisasi pada saat akhir periode transien. Jika respon sistem mengalami osilasi saat terjadi gangguan dan kemudian dapat teredam dengan sendirinya, maka sistem dapat dikatakan stabil. Jika osilasi terjadi secara terus menerus hingga periode yang lama maka sistem dikatakan tidak stabil.

Kestabilan dalam sistem tenaga listrik sangat dipengaruhi oleh gangguan, sedangkan klasifikasi gangguan dibagi menjadi 2 macam, yaitu gangguan kecil dan gangguan besar. Gangguan kecil berupa perubahan beban yang berlangsung terus menerus, sedangkan gangguan besar seperti lepasnya generator, terjadinya hubung singkat.

2.2 Klasifikasi Kestabilan

Terdapat banyak faktor yang dapat mempengaruhi kestabilan suatu sistem tenaga listrik, maka dibutuhkan suatu pengelompokan sistem tenaga listrik guna mempermudah analisa kestabilan. Berdasarkan Paper IEEE *definition and classification of power system stability*, kestabilan sistem tenaga listrik dibagi menjadi tiga kategori, yaitu :

1. Kestabilan sudut rotor
2. Kestabilan frekuensi
3. Kestabilan tegangan



Gambar 2.1 Klasifikasi Kestabilan Sistem Tenaga

2.2.1 Kestabilan Frekuensi

Kestabilan ini berkaitan dengan kemampuan dari sistem untuk mempertahankan kestabilan frekuensi akibat gangguan pada sistem yang mengakibatkan ketidakseimbangan antara pembangkitan dan beban. Pada umumnya masalah kestabilan frekuensi dikaitkan dengan ketidakmampuan dari respons peralatan, koordinasi yang buruk pada peralatan kontrol dan peralatan proteksi, atau kurangnya daya cadangan pembangkitan.

Selama terjadinya penyimpangan frekuensi, besarnya tegangan mungkin dapat berubah dengan signifikan, terutama untuk kondisi *islanding* yang menggunakan *underfrequency load shedding* untuk melepas bebannya. Perubahan nilai tegangan yang mungkin prosentasenya lebih besar dari perubahan frekuensi dapat mengakibatkan ketidakseimbangan antara pembangkitan dan beban.

Equilibrium point (titik keseimbangan) antara suplai daya sistem dan beban harus dipertahankan untuk menjaga sistem dari *generator outage*

Klasifikasi kestabilan frekuensi diklasifikasikan menjadi dua, yaitu jangka panjang dan jangka pendek. Contoh fenomena jangka pendek untuk kestabilan frekuensi adalah pada pembentukan *undergenerated island* dengan pelepasan beban *underfrequency* yang tidak mencukupi, sehingga frekuensi menurun secara tiba-tiba dan menyebabkan sistem mati total dalam durasi beberapa detik. Sedangkan kestabilan frekuensi jangka panjang biasanya disebabkan oleh kontrol *governor* tidak bekerja ketika terdapat gangguan. Rentang waktu fenomena jangka panjang yaitu puluhan detik hingga beberapa menit.

2.2.2 Kestabilan Sudut Rotor

Kestabilan sudut rotor adalah kemampuan dari beberapa mesin sinkron yang saling terinterkoneksi pada suatu sistem tenaga untuk mempertahankan kondisi sinkron setelah terjadi gangguan. Kestabilan sudut rotor bergantung pada kemampuan untuk mempertahankan keseimbangan antara torsi elektromagnetik dan mekanik pada mesin-mesin tersebut. Ketidakstabilan mengakibatkan peningkatan kecepatan sudut yang berubah-ubah pada generator, yang akan menyebabkan hilangnya sinkronisasi antar generator. Hal ini terjadi karena daya output generator yang berubah sesuai dengan berubahnya rotor. Kestabilan sudut rotor pada gangguan besar merupakan kemampuan sistem tenaga

listrik untuk mempertahankan sinkronisasi, salah satu contohnya adalah seperti hubungan singkat pada saluran transmisi.

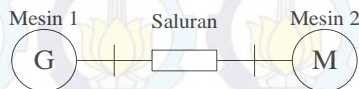
Pada saat sistem dalam kondisi *steady state* terdapat kesetimbangan antara torsi elektrik dan torsi mekanik dari masing-masing generator dengan kecepatan konstan. Jika sistem mengalami gangguan, titik kesetimbangan ini akan berubah dan mengakibatkan percepatan atau perlambatan sudut rotor. Ketika salah satu generator berputar lebih cepat dari generator yang lain, posisi sudut rotor relatif terhadap generator yang lebih lambat akan meningkat. Perbedaan sudut yang dihasilkan antara mesin yang lebih lambat dengan mesin yang lebih cepat ini bergantung pada hubungan daya dan sudut rotor. Kestabilan sudut rotor secara umum dibedakan menjadi dua bagian, yaitu:

- a) Kestabilan sudut rotor akibat gangguan kecil
- b) Kestabilan sudut rotor akibat gangguan besar atau kestabilan transien

Kestabilan sudut rotor akibat gangguan kecil berhubungan dengan kemampuan sistem tenaga untuk mempertahankan kesinkronan akibat gangguan kecil. Studi kestabilan ini mempunyai kurun waktu 10-20 detik setelah gangguan dan tergantung pada operasi awal sistem. Ketidakstabilan ini terjadi akibat dua hal yang penting yaitu kurangnya torsi sinkronisasi dan kurangnya torsi *damping*.

Kestabilan ini berkaitan dengan kemampuan sistem tenaga listrik untuk mempertahankan kondisi sinkron akibat gangguan besar seperti gangguan hubung singkat. Respon sistem akibat gangguan besar ini melibatkan besarnya penyimpangan sudut rotor generator dan dipengaruhi juga oleh ketidaklinearan hubungan sudut daya.

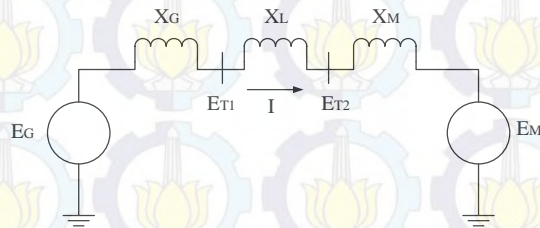
Kestabilan transien bergantung pada kondisi inisial dari sistem dan juga bergantung pada besarnya gangguan yang terjadi. Untuk kestabilan transien biasanya diamati dalam kurun waktu 3-5 detik setelah gangguan, atau juga bisa 10-20 detik setelah gangguan jika sistemnya sangat besar.



Gambar 2.2 Diagram Impedansi Sistem Dua Mesin

Salah satu karakteristik terpenting dalam kestabilan sistem tenaga listrik adalah hubungan antara perubahan daya dan posisi rotor pada mesin sinkron. Gambar diatas menunjukkan dua mesin sinkron yang memiliki nilai reaktansi namun nilai resistansi dan kapasitansi diabaikan, mesin 1 diasumsikan sebagai generator yang mensuplai daya ke motor (mesin 2). Daya yang disalurkan adalah fungsi perbedaan sudut (δ) antara dua mesin. Perbedaan sudut ini dapat terjadi karena beberapa faktor, yaitu :

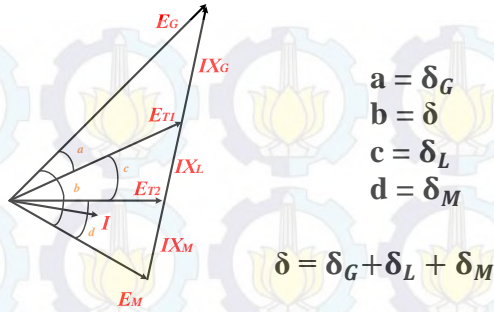
1. Sudut internal generator δ_G , sudut dimana rotor dari generator mendahului medan putar pada stator.
2. Perbedaan sudut antara tegangan terminal generator dan motor, sudut δ_L dimana tegangan terminal generator mendahului tegangan motor.
3. Sudut internal motor δ_M , sudut dimana rotor tertinggal oleh medan putar stator pada motor.



Gambar 2.3 Model Ideal Sistem Dua Mesin

Gambar diatas menunjukkan sebuah model dari sistem yang dapat digunakan untuk menunjukkan hubungan antara daya terhadap sudut, dimana:

E_G	=	Tegangan internal generator (p.u)
E_M	=	Tegangan internal motor (p.u)
X_G	=	Reaktansi internal generator (p.u)
X_M	=	Reaktansi internal motor (p.u)
X_L	=	Reaktansi saluran (p.u)



Gambar 2.4 Diagram Fasor Sistem Dua Mesin

Gambar diatas menunjukkan diagram fasor hubungan antara tegangan internal motor E_M dengan tegangan internal generator E_G . Berdasarkan Gambar *phasor* di atas, maka didapatkan suatu persamaan yang menyatakan hubungan daya generator yang ditransfer ke motor dalam fungsi sudut, yaitu :

$$P = \frac{E_G E_M}{X_T} \sin \delta \quad (2.1)$$

$$X_T = X_G + X_L + X_M \quad (2.2)$$

2.2.3 Kestabilan Tegangan

Kestabilan tegangan adalah kemampuan dari suatu sistem tenaga listrik untuk mempertahankan kestabilan tegangan pada semua bus dari sistem setelah mengalami gangguan. Kestabilan tegangan bergantung pada kemampuan sistem untuk mempertahankan kesetimbangan antara *supply* daya dari pembangkit dan jumlah pembebanannya. Gangguan yang biasanya terjadi adalah lepasnya beban secara tiba-tiba ataupun hilangnya sinkron dari salah satu pembangkit sehingga tegangan menjadi turun secara drastis. Kestabilan tegangan menyangkut dengan gangguan besar dan gangguan kecil dalam jangka waktu pendek maupun panjang. Ketidakstabilan yang mungkin terjadi adalah terjadinya peningkatan atau jatuhnya nilai tegangan pada beberapa bus pada sistem. Faktor utama yang menjadi penyebab ketidakstabilan tegangan adalah ketidakmampuan dari sistem untuk memenuhi kebutuhan daya reaktif beban.

Penurunan tegangan bus dapat juga dihubungkan dengan ketidakstabilan sudut rotor. Contohnya, ketika terjadi *loss of synchronism* di antara dua grup mesin akan mengakibatkan tegangan yang sangat rendah di tengah saluran sistem.

Kestabilan tegangan dikelompokkan menjadi dua macam, berdasarkan gangguannya:

1. Kestabilan tegangan akibat gangguan besar
2. Kestabilan tegangan akibat gangguan kecil

2.2.3.1 Kestabilan Tegangan akibat Gangguan Besar

Kemampuan dari sistem tenaga untuk menjaga tegangan *steady* setelah mengalami gangguan besar seperti *generator outage* atau hilangnya pembangkitan dan *short circuit*. Penentuannya dengan pengujian pada sistem tenaga selama periode waktu tertentu untuk mengamati interaksi dan kinerja peralatan *tap changer* trafo, dan pengamanan sistem tenaga listrik ketika terjadi gangguan.

2.2.3.2 Kestabilan Tegangan akibat Gangguan Kecil

Kemampuan sistem tenaga untuk menjaga kondisi tegangan *steady* ketika mengalami gangguan kecil seperti perubahan pada beban. Konsep ini berguna dalam penentuan bagaimana tegangan sistem akan merespon perubahan-perubahan kecil pada sistem kelistrikan. Kestabilan tegangan gangguan kecil digunakan sebagai evaluasi tegangan sistem merespon perubahan kecil beban listrik.

2.2.3.3 Kestabilan Tegangan Jangka Pendek

Gangguan kestabilan tegangan jangka pendek mengakibatkan kedip tegangan (*voltage sags*) dan kenaikan tegangan (*swells*) [3].

1. Kedip Tegangan (*Voltage Sag*)
Kedip tegangan merupakan fenomena penurunan *magnitude* tegangan efektif terhadap harga nominalnya selama periode antara 0,5 cycle hingga 1 menit.
2. Kenaikan Tegangan (*Swells*)
Kenaikan tegangan merupakan fenomena peningkatan *magnitude* tegangan efektif terhadap harga nominalnya dengan durasi antara 0,5 cycle hingga 1 menit.

2.2.3.4 Kestabilan Tegangan Jangka Panjang

Gangguan kestabilan tegangan jangka panjang mengakibatkan tegangan lebih (*overvoltage*) dan tegangan kurang (*undervoltage*).

1. Tegangan Lebih (*Overvoltage*)

Overvoltage merupakan peningkatan nilai efektif tegangan hingga melebihi 110 persen dari tegangan nominal ketika melebihi satu menit.

2. Tegangan Kurang (*Undervoltage*)

Undervoltage merupakan penurunan nilai efektif tegangan hingga melebihi 90 persen dari tegangan nominal ketika melebihi satu menit.

2.3 Kestabilan Transien

Kestabilan transien adalah kemampuan sistem tenaga listrik dalam mempertahankan kondisi sinkronisasi ketika sistem mengalami gangguan transien, yaitu gangguan besar yang bersifat tiba-tiba selama periode satu ayunan pertama. Kestabilan transien terjadi ketika tegangan otomatis dan pengatur frekuensi belum bekerja. Pengklasifikasian kestabilan dilakukan secara sistematis dan berdasarkan pada beberapapertimbangan, yaitu:

- a) Ukuran dari gangguan
- b) Pemodelan yang tepat dan analisis gangguan yang spesifik
- c) Rentang waktu saat gangguan berlangsung
- d) Parameter sistem yang paling berpengaruh

Transient Stability Assessment atau studi tentang kestabilan transien harus dilakukan karena suatu sistem dapat dikatakan stabil pada kestabilan *steady state*, namun belum tentu stabil pada kestabilan transien, sehingga studi ini perlu dilakukan guna untuk mengetahui apakah sistem dapat bertahan saat gangguan transien terjadi. Gangguan kestabilan transien dapat terjadi karena beberapa faktor, yaitu :

- a) Beban lebih akibat lepasnya satu generator dari sistem
- b) Hubungan singkat (*short circuit*)
- c) *Starting* pada motor
- d) Pelepasan beban yang mendadak

2.3.1. Hubungan Singkat (*Short Circuit*)

Gangguan hubung singkat merupakan gangguan yang paling terjadi dalam satu sistem tenaga listrik. Gangguan hubung singkat ini dapat disebabkan adanya sambaran petir, kegagalan isolasi, gangguan binatang dan ranting pohon. Saat terjadi hubung singkat, arus yang mengalir menuju titik gangguan bernilai sangat besar sehingga tegangan di sekitar titik gangguan akan menurun secara signifikan. Semakin besar arus hubung singkat maka semakin rendah tegangan di sekitar titik gangguan. Hal ini akan mengakibatkan kestabilan sistem menjadi terganggu. Selain itu dapat merusak peralatan karena nilai arus yang sangat besar.

2.3.2. Motor Starting

Pada saat motor di *start*, ada arus yang sangat tinggi yang besarnya 6 sampai 8 kali dari arus nominal. Arus ini disebut dengan *locked rotor current* (LRC) yang nilainya bervariasi pada tiap motor. Arus *starting* yang sangat besar ini akan mengakibatkan drop tegangan pada sistem. Hal ini dikarenakan arus yang besar ini melewati impedansi saluran, trafo sehingga drop tegangan pada saluran semakin besar. Selain itu arus *starting* yang besar juga akan mengakibatkan rugi-rugi daya aktif pada saluran bertambah besar sehingga dapat menurunkan frekuensi generator. Drop tegangan dan turunnya frekuensi ini dapat mengakibatkan kestabilan sistem menjadi terganggu.

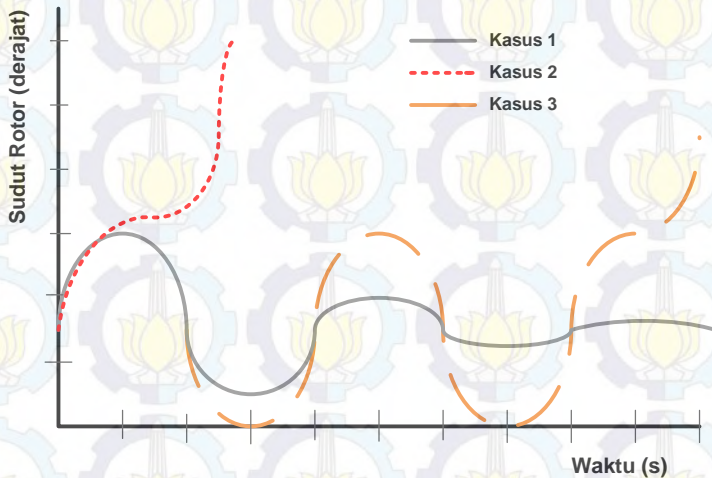
2.3.3. Penambahan Beban secara Tiba-Tiba

Penambahan beban pada suatu sistem tenaga listrik dapat mengakibatkan timbulnya gangguan peralihan jika:

- a) Jumlah beban melebihi batas kestabilan keadaan mantap untuk kondisi tegangan dan reaktansi rangkaian tertentu
- b) Jika beban dinaikkan sampai terjadi osilasi, sehingga menyebabkan sistem mengalami ayunan yang melebihi titik kritis yang tidak dapat kembali.

Apabila sistem tenaga listrik dilakukan pembebanan dengan beban penuh secara tiba-tiba, maka arus yang diperlukan sangat besar akibatnya frekuensi sistem akan turun dengan cepat. Pada kondisi demikian sistem akan keluar dari keadaan sinkron walaupun besar beban belum mencapai batas kestabilan mantap yaitu daya maksimumnya. Hal ini dikarenakan daya keluar elektrik generator jauh melampaui daya masukan mekanis generator atau daya yang dihasilkan penggerak mula,

dan kekurangan ini disuplai dengan berkurangnya energi kinetis generator. Sehingga putaran generator turun atau frekuensi sistem turun, sudut daya δ bertambah besar dan melampaui sudut kritisnya, akibatnya generator akan lepas sinkron atau tidak stabil. Sesaat dilakukannya pembebanan tersebut, rotor generator akan mengalami ayunan dan getaran yang besar.



Gambar 2.5 Respon Sudut Rotor terhadap Gangguan Transien

Karakteristik mesin sinkron untuk kondisi *stable* dan *unstable* ditunjukkan pada Gambar 2.5 diatas. Terdapat 3 kasus pada gambar tersebut, pada kasus pertama sudut rotor mengalami kenaikan hingga nilai maksimum kemudian berosilasi sehingga sudut rotor kembali mencapai kondisi *stable*. Pada kasus kedua, rotor kehilangan sinkronisasi sehingga sudut rotor terus naik mencapai kondisi *unstable* saat ayunan pertama. Adapun penyebab utama pada kasus ini adalah kurangnya sinkronisasi torsi. Pada kasus ketiga, sistem tetap *stable* saat ayunan pertama namun pada kondisi akhir sistem menjadi *unstable*. Bentuk *unstable* pada kasus ini umumnya terjadi pada kondisi *postfault steady-state*, bukan akibat dari gangguan transien melainkan akibat dari gangguan dinamik.

Sudut rotor, frekuensi, dan tegangan akan berubah selama periode transien dan *magnitude* dari tegangan kumparan medan akan dipengaruhi oleh beberapa faktor, yaitu :

- Arus induksi pada kumparan peredam (damper winding) selama terjadinya perubahan nilai arus pada kumparan jangkar. Periode ini terjadi pada 0,1 s dan disebut efek *subtransient*
- Arus induksi pada kumparan medan selama terjadinya perubahan mendadak pada arus kumparan jangkar. Periode ini terjadi pada 2 s dan disebut efek *transient*.

Kestabilan transien dapat dideteksi dengan adanya hentakan yang kuat, yaitu gangguan yang dipertahankan dalam waktu yang singkat yang menyebabkan reduksi terminal mesin dan kemampuan transfer daya. Estimasi nilai transfer daya pada mesin tunggal yang terhubung ke *infinite bus* dapat dihitung melalui persamaan berikut :

$$P = \frac{V_t V_\infty}{X} \sin \delta \quad (2.3)$$

Dimana,

V_t = tegangan terminal mesin

V_∞ = tegangan infinite bus

V_t berbanding lurus dengan P, sehingga jika V_t tereduksi, maka P akan tereduksi oleh nilai terkait. Diperlukan aksi yang sangat cepat pada sistem eksitasi dalam memberikan eksitasi pada kumparan medan guna mencegah reduksi pada P. Oleh karena itu, nilai V_t akan dipertahankan pada nilai yang layak. Perubahan yang cepat juga diperlukan pada eksitasi ketika reaktansi X bertambah pada peristiwa pemutusan (*switching*).

2.4 Dinamika Rotor dan Persamaan Ayunan

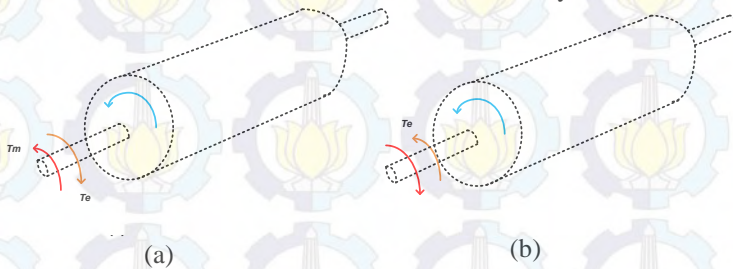
Pada dasarnya persamaan dari pengaturan gerakan satu mesin rotor merupakan prinsip dasar dinamika yang menyatakan bahwa torsi percepatan (*accelerating torque*) merupakan hasil perkalian dari percepatan sudut dan momen kelembaman (*inertia*) rotor. Pada sistem meter-kilogram-second (MKS) persamaannya dapat dituliskan sebagai :

$$J \frac{d^2 \theta_m}{dt^2} = T_a = T_m - T_e \quad (2.4)$$

Dimana,

J	Momen inersia total dari massa rotor dalam $kg-m^2$
θ_m	Pergeseran sudut dari rotor terhadap suatu sumbu yang diam dalam radian mekanis (rad)
T_e	Momen putar listrik atau elektromagnetik, (N-m)
T_a	Momen putar kecepatan percepatan bersih (<i>net</i>), (N-m)
t	Waktu dalam detik (s)
T_m	Momen putar mekanis atau poros penggerak yang diberikan oleh <i>prime mover</i> dikurangi dengan momen putar perlambatan (<i>retarding</i>) yang disebabkan oleh rugi-rugi perputaran (N-m)

Jika torsi mekanis T_m dianggap positif pada generator sinkron, maka hal ini menandakan bahwa T_m ialah resultan torsi yang mempunyai kecenderungan untuk mempercepat rotor dalam arah putaran θ_m yang positif. Sedangkan jika T_m bernilai negatif, maka hal tersebut menandakan bahwa T_m memiliki kecenderungan untuk memperlambat rotor dalam arah putaran θ_m yang positif. Jika T_m sama dengan T_e dan T_a sama dengan nol untuk generator yang bekerja dalam keadaan tetap (*steady state*). Dalam keadaan ini tidak ada percepatan atau perlambatan terhadap massa rotor dan kecepatan tetap resultan adalah kecepatan sinkron. Massa yang berputar meliputi rotor dari generator dan *prime mover* berada dalam keadaan sinkron dalam sistem daya tersebut.



Gambar 2.6 Representasi Suatu Rotor Mesin yang Membandingkan Arah Perputaran serta Momen Putar Mekanis dan Listrik untuk Generator (a) dan Motor (b)

Prime mover untuk persamaan diatas berlaku untuk suatu turbin air atau turbin uap dan masing-masing turbin memiliki berbagai model

dengan tingkat kesulitan yang beragam dalam menggambarkan pengaruh T_m . Adapun dalam penulisan ini, dianggap konstan pada setiap keadaan kerja yang diberikan. Asumsi ini cukup baik untuk generator, meskipun input dari *prime mover* diatur oleh regulator (*governors*). *Governors* tidak akan bekerja sebelum adanya perubahan kecepatan, dengan demikian hal ini dianggap kurang efektif untuk periode waktu dimana hanya dinamika rotor yang diinginkan. Torsi elektrik T_e sesuai dengan daya *airgap* pada mesin, dan dengan demikian menyumbang daya output total generator ditambah rugi-rugi I^2R di belitan jangkar. Pada motor sinkron, arah aliran daya berlawanan dengan generator. Oleh sebab itu, baik T_m dan T_e tandanya dibalik pada persamaan 2.3. Seperti yang terlihat pada gambar 2.6, T_e kemudian sesuai dengan daya *airgap* yang disuplai oleh sistem ke rotor, dimana T_m merepresentasikan torsi balik dari beban dan rugi rotasi yang cenderung menghambat rotor.

Karena θ_m diukur dengan sumbu referensi stasioner pada stator, yang merupakan ukuran mutlak dari sudut rotor, akibatnya, θ_m meningkat secara kontinyu dengan waktu dan kecepatan sinkron yang konstan. Dikarenakan kecepatan rotor bersifat *relative* terhadap kecepatan sinkron, maka akan lebih mudah untuk mengukur posisi sudut rotor terhadap sumbu referensi yang berputar pada kecepatan sinkron, yang dapat didefinisikan sebagai berikut :

$$\theta_m = \omega_{sm} t + \delta_m \quad (2.5)$$

Dimana,

ω_{sm} : Kecepatan sinkron mesin (*radians/detik*)

δ_m : Sudut pergeseran rotor, dalam *mechanical radians*, dari sumbu referensi putaran sinkron (derajat)

Penurunan persamaan (2.5) :

$$\frac{d\theta_m}{dt} = \omega_{sm} + \frac{d\delta_m}{dt} \quad (2.6)$$

$$\frac{d^2\theta_m}{dt^2} = \frac{d^2\delta_m}{dt^2} \quad (2.7)$$

Persamaan (2.6) menunjukkan bahwa kecepatan sudut rotor $\frac{d\theta_m}{dt}$ adalah konstan dan kecepatan sinkron hanya saat $\frac{d\delta_m}{dt}$ adalah nol. Oleh

karena itu, $\frac{d\delta_m}{dt}$ menunjukkan deviasi kecepatan rotor saat sinkron dengan satuan pengukuran mechanical radians per detik. Persamaan (2.7) merepresentasikan percepatan rotor dikur pada mekanikal radian per *second* kuadrat. Dengan mensubstitusikan persamaan (2.7) pada (2.4), maka didapatkan :

$$J \frac{d^2 \delta_m}{dt^2} = T_a = T_m - T_e \quad \text{N-m} \quad (2.8)$$

Untuk mempermudah persamaan kecepatan sudut rotor didefinisikan sebagai berikut:

$$\omega_m = \frac{d\theta_m}{dt} \quad (2.9)$$

Menurut prinsip dasar dinamika rotor yang menyatakan bahwa daya (P) adalah perkalian antara torsi dengan kecepatan sudut, maka jika persamaan (2.8) dikalikan dengan ω_m akan didapatkan persamaan sebagai berikut :

$$J \omega_m \frac{d^2 \delta_m}{dt^2} = P_a = P_m - P_e \quad \text{W} \quad (2.10)$$

Dimana,

P_m : Daya mekanis

P_e : Daya elektrik

P_a : Daya percepatan yang menyumbang ketidakseimbangan diantara keduanya

Koefisien $J \omega_m$ adalah momentum sudut rotor pada kecepatan sinkron ω_{sm} dan dinotasikan dengan M (konstanta inersia mesin). Satuan M adalah *joule-seconds per mechanical radian*, sehingga persamaan juga dapat dituliskan dalam bentuk sebagai berikut:

$$M \frac{d^2 \delta_m}{dt^2} = P_a = P_m - P_e \quad \text{W} \quad (2.11)$$

Dalam data mesin untuk studi stabilitas transien terdapat suatu konstanta yang sering dijumpai yaitu inersia mesin (H) yang didefinisikan dengan,

$$H = \frac{\text{Daya kinetis yang disimpan dalam mega joule pada kecepatan sinkron}}{\text{rating mesin dalam MVA}} \quad (2.12)$$

$$H = \frac{\frac{1}{2} J \omega_{sm}^2}{S_{mach}} = \frac{\frac{1}{2} M \omega_{sm}}{S_{mach}} \text{ MJ/MVA} \quad (2.13)$$

Dimana S_{mach} adalah rating 3 fase dari mesin dalam MVA. Dengan menyelesaikan persamaan untuk mendapatkan nilai M pada persamaan (2.13), didapatkan :

$$M = \frac{2H}{\omega_{sm}} S_{mach} \text{ MJ/mech rad} \quad (2.14)$$

Dengan mensubstitusikan M di persamaan (2.11), didapatkan :

$$\frac{2H}{\omega_{sm}} \frac{d^2 \delta_m}{dt^2} = \frac{P_a}{S_{mach}} = \frac{P_m - P_e}{S_{mach}} \quad (2.15)$$

δ_m memiliki satuan *mechanical radians* pada persamaan (2.15), dimana ω_{sm} memiliki satuan *mechanical radians per second*. Oleh sebab itu persamaan dapat ditulis sebagai :

$$\frac{2H}{\omega_s} \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_a = P_m - P_e \text{ per unit} \quad (2.16)$$

Dengan $\omega_s = 2\pi f$, maka persamaan (2.16) menjadi,

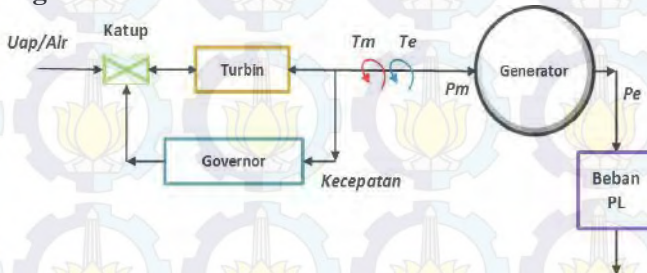
$$\frac{H}{\pi f} \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_a = P_m - P_e \quad (2.17)$$

Saat δ dalam *electrical radians*,

$$\frac{H}{180f} \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_a = P_m - P_e \quad (2.18)$$

Persamaan (2.16) menjelaskan *swing equation* mesin berupa persamaan dasar yang mengatur dinamika rotasi dari mesin sinkron pada studi stabilitas.

2.5 Pengaturan Frekuensi



Gambar 2.7 Blok Diagram Konsep Dasar Speed Governing

Keterangan gambar:

- T_m = torsi mekanik
- P_m = daya mekanik
- T_e = torsi elektrik
- P_e = daya elektrik
- P_L = Daya beban

Saat ada perubahan beban, terjadi perubahan torsi elektrik (T_e) pada generator secara instan. Hal ini menyebabkan perbedaan antara torsi mekanik (T_m) dan torsi elektrik (T_e) yang menyebabkan perbedaan kecepatan. Daya aktif mempunyai hubungan erat dengan nominal frekuensi pada sistem. Penyediaan daya aktif sistem harus sesuai dengan kebutuhan daya aktif agar frekuensi tetap dalam batas yang diizinkan. Penyesuaian daya aktif ini dilakukan dengan mengatur kopel mekanis untuk memutar generator, yang tidak lain merupakan pengaturan pemberian bahan bakar turbin. Pengaturan pemberian bahan bakar ini dilakukan oleh governor. Governor akan menambah kapasitas bahan bakar ketika frekuensi turun dari nominalnya dan mengurangi kapasitas ketika frekuensi naik dari nominalnya. Mode operasi speed governor dibagi menjadi dua, yaitu :

- a) *Mode droop*
- b) *Mode isochronous*

2.5.1 Mode Droop

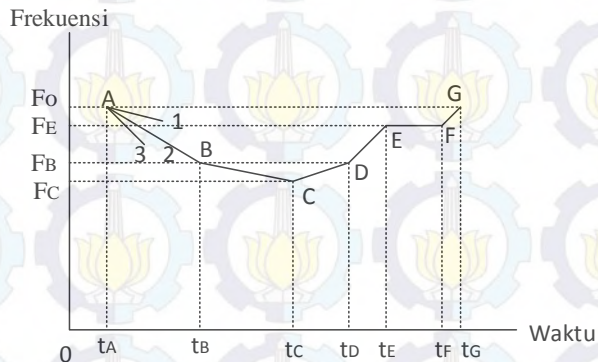
Mode droop governor sudah memiliki *set point* daya mekanik yang besarnya sesuai dengan rating generator atau menurut kebutuhan. Dengan adanya *fixed setting*, nilai *output* daya listrik generator akan tetap sehingga perubahan beban tidak mempengaruhi putaran turbin (daya berbanding lurus dengan putaran).

2.5.2 Mode Isochorus

Pada mode *isochronous set point* putaran governor ditentukan berdasarkan kebutuhan daya pada sistem saat itu secara *real time*. Governor akan menyesuaikan nilai *output* daya mekanik turbin agar sesuai dengan kebutuhan daya listrik. Caranya dengan mengatur governor berdasarkan *logic control* dari pabrikan generator. Mode ini dapat menjaga frekuensi sistem tetap berada dalam batas yang diizinkan sehingga generator tidak mengalami *loss of synchronization*.

2.6 Load Shedding (Pelepasan Beban)

Jika terjadi gangguan pada sistem yang menyebabkan besarnya suplai daya yang dihasilkan oleh pembangkit tidak mencukupi kebutuhan beban misalnya karena adanya pembangkit yang lepas (*trip*), maka untuk mencegah terjadinya ketidakstabilan sistem perlu dilakukan pelepasan beban (*load shedding*). Keadaan yang kritis pada sistem dapat dideteksi melalui frekuensi sistem yang menurun dengan cepat. Hal ini diilustrasikan pada gambar 2.8.



Gambar 2.8 Perubahan frekuensi sebagai fungsi waktu dengan adanya pelepasan beban

Pada saat $t=t_A$, ada unit pembangkit yang lepas sehingga frekuensi menurun dengan tajam. Penurunan frekuensi sistem ini bisa melalui garis 1, garis 2 atau garis 3 bergantung pada besarnya kapasitas pembangkit yang lepas dibandingkan dengan kebutuhan beban yang ada. Semakin besar daya yang hilang maka akan semakin cepat frekuensi menurun. Kecepatan menurunnya frekuensi sistem juga bergantung pada inersia sistem. Semakin besar nilai inersia, makin kokoh sistemnya dan makin lambat turunnya frekuensi. Berikut adalah penjelasan mengenai gambar 2.8 :

- A. Dimisalkan penurunan frekuensi terjadi pada garis 2, dari garis 2 frekuensi turun secara drastis. Ketika frekuensi mencapai F_B maka akan dilakukan *Load Shedding* tahap 1 (titik B). Dengan adanya *Load Shedding* tahap 1 membuat penurunan frekuensi turun secara melambat.
- B. Ketika terjadi penurunan frekuensi hingga F_C maka akan dilakukan *Load Shedding* tahap 2 (titik C). Dengan adanya *Load Shedding* tahap 2 frekuensi sistem menjadi naik. Namun kenaikan frekuensi masih terlalu lambat sehingga untuk mencapai frekuensi normal membutuhkan waktu yang lama.
- C. Ketika frekuensi mencapai frekuensi F_B perlu dilakukan *Load Shedding* tahap 3 (titik D). Dengan adanya *Load Shedding* tahap 3 untuk mencapai frekuensi normal dapat dilakukan sedikit lebih cepat namun kecepatannya kenaikan masih terlalu lambat untuk mencapai frekuensi normal.
- D. Sehingga ketika mencapai frekuensi F_E dilakukan *Load Shedding* tahap 4 (titik E). Dengan adanya *Load Shedding* tahap 4 membuat frekuensi sistem menjadi stabil.
- E. Namun kestabilan frekuensi sistem masih dibawah standart yang ada sehingga ketika $t=t_F$ dilakukan *Load Shedding* tahap 5 (titik F). Akibat *Load Shedding* tahap 5 membuat frekuensi sistem kembali ke frekuensi normal.

Pelepasan beban dapat dilakukan dengan dua cara yaitu :

1. Pelepasan beban secara manual (*Manual Load Shedding*)
2. Pelepasan beban secara otomatis (*Automatic Load Shedding*)

2.6.1 Pelepasan Beban Secara Manual

Pelepasan beban secara manual hanya dapat dipakai dalam keadaan yang tidak begitu penting, seperti perkembangan beban yang melebihi kapasitas pembangkit atau turunnya tegangan di dalam daerah tertentu yang disebabkan oleh gangguan. Dalam keadaan darurat karena turunnya tegangan hingga 80%, operator akan mengambil inisiatif sendiri untuk melakukan pelepasan beban. Kekurangan dari pelepasan beban secara manual adalah kebutuhan akan operator yang siap dan handal karena keterlambatan operator dalam mengatasi permasalahan ini akan berakibat fatal pada stabilitas sistem.

2.6.2 Pelepasan Beban secara Otomatis

Pelepasan beban secara otomatis menggunakan relay *under frequency* berdasarkan seberapa besar turunnya frekuensi sistem. Perencanaan dan setting rele *under frequency* untuk *Load Shedding* harus dalam kondisi beban berlebih sehingga generator tidak mampu memenuhi kebutuhan beban, atau disebabkan lepasnya salah satu generator dengan sistem. Dengan kelebihan beban maka frekuensi sistem akan turun. Untuk menghindari black out akibat generator overload maka diperlukan *Load Shedding*. Sehingga jika terjadi gangguan yang mengakibatkan kelebihan beban maka beban akan terlepas dengan sendirinya sesuai dengan setting rele *under frequency* (81-U).

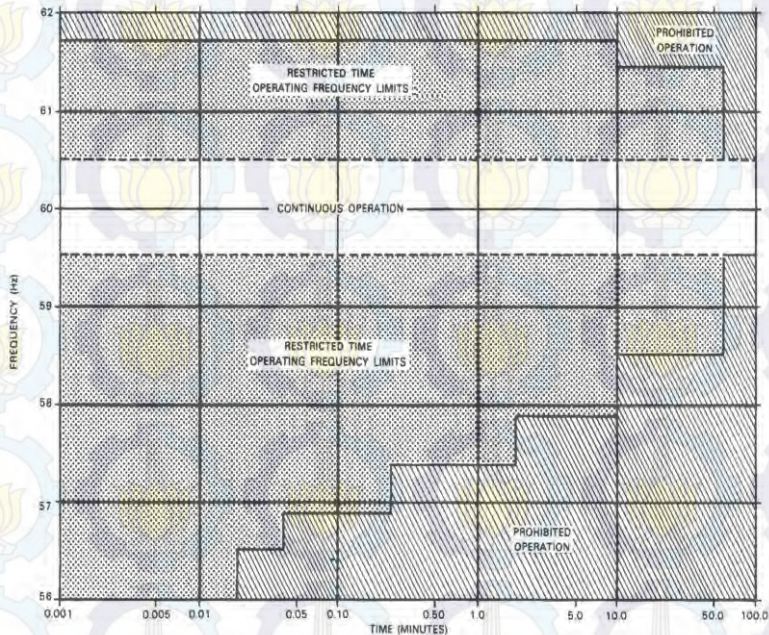
Pelepasan beban tidak dilakukan secara langsung kelebihan bebannya. Namun pelepasan beban dilakukan secara bertahap. Hal ini untuk menghindari ketika dilakukan pelepasan beban terjadi overvoltage. Setting rele *underfrequency* mempunyai beberapa settingan sesuai dengan tahapan pelepasan beban. Rele *underfrequency* ditempatkan pada substation-substation dan menginterkoneksi dengan pemutus daya pada feeder yang ingin di lepas.

2.7 Standar yang Digunakan untuk Analisis Kestabilan Transien

2.7.1 Standar Frekuensi

Berdasarkan IEEE Std C37.106-2003 (Revision of ANSI/IEEE C37.106-1987), penggerak utama generator seringkali lebih rentan terhadap operasi frekuensi off. Secara khusus, kelelahan *bladesturbin* adalah perhatian utama. Turbin uap terdiri dari beberapa tahapan yang dirancang untuk berbagai tekanan uap. Setiap turbin terdiri dari

beberapa baris *blades* individu dengan panjang yang berbeda. Uap diinjeksikan ke dalam turbine melalui pipa sehingga berdampak pada *blades* dan menyebabkan rotasi sehingga *blades* mengalami deformasi. Tekanan pada *blades* dan frekuensi yang dikenakan tergantung pada kecepatan rotasi turbin. Panjang *blades* dan desainnya akan menentukan resonansi frekuensi



Gambar 2.9 Standar Frekuensi untuk *Steam Turbin Generator* (IEEE Std C37.106-2003)

Pada gambar diatas terdapat 3 daerah operasi untuk *steam turbin generator*, yakni:

1. *Restricted time operating frequency limits* merupakan daerah frekuensi yang masih diijinkan namun hanya bersifat sementara (tergantung besar frekuensi dan waktu). Semakin besar turun frekueusinya maka semakin pendek waktu yang diijinkan frekuensi pada kondisi tersebut.
2. *Prohibited operation* merupakan daerah frekuensi terlarang, sehingga frekuensi tidak diijinkan mencapai daerah tersebut.

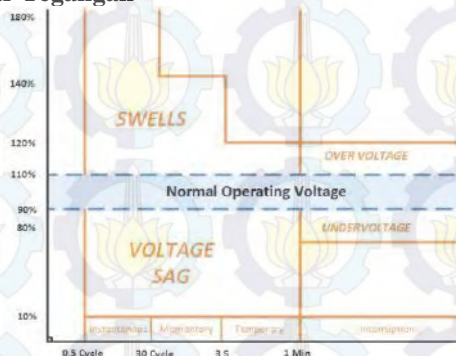
3. *Continuous operation* merupakan daerah frekuensi normal.

Batas frekuensi normal umumnya didasarkan pada kondisi terburuk karena:

- Frekuensi dasar *blades* yang berbeda karena toleransi manufaktur
- Kekuatan kelelahan bisa menurun dengan operasi normal seperti kasus *pitting corrosion* dan erosi tepi *blades*
- Erosi dan korosi *blades* dapat menyebabkan pergeseran kecil di frekuensi dasar dari *blades*
- Pengaruh rugi tambahan dari masa *blades* yang terjadi selama kondisi operasi *abnormal*

Setiap manufaktur/produsen memiliki karakteristik tertentu untuk batas operasi frekuensi *abnormal*. Batas tersebut dapat direpresentasikan dalam grafik untuk membantu dalam penentuan pengaturan perangkat pelindung. Gambar 2.9 adalah standar untuk menggambarkan batas operasional turbin uap. Daerah antara 59,5 dan 60,5 Hz adalah batas daerah operasi yang diperbolehkan, sedangkan daerah yang diarsir (diatas 60,5 Hz dan dibawah 59,5 Hz) adalah batas daerah yang dilarang. Jika dikonversikan dalam standar sistem frekuensi 50 Hz maka 59,5 Hz sama dengan 49,58 Hz (99,17%) dan 60,5 Hz sama dengan 50,42 Hz (100,83%)

2.7.2 Standar Tegangan



Gambar 2.10 Definisi *Voltage Magnitude Event* berdasarkan Standar IEEE 1195-1995

Standar yang digunakan untuk tegangan nominal dalam kondisi normal adalah berdasarkan standar PLN, yaitu :

- 500 kV +5%, -5%
- 150 kV +5%, -10%
- 70 kV +5%, -10%
- kV +5%, -10%

Sedangkan standar yang digunakan untuk kedip tegangan adalah *IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality* (IEEE Std 1159-1995). Gambar 2.7 menunjukkan bahwa untuk kedip tegangan batas nilai yang diperbolehkan adalah 10% untuk *momentary* selama 3 detik senagkan untuk *temporary* selama 1 menit.

2.7.3 Standar Pelepasan Beban

Ketika beban dalam kondisi kekurangan suplai daya, tidak diijinkan melepas beban secara besar-besaran. Terdapat dua skema pelepasan beban yang mengacu pada standar ANSI/IEEE C37.106-1987, yaitu pelepasan beban tiga langkah dan pelepasan beban enam langkah. Tabel di bawah merupakan skema pelepasan beban tiga langkah dan enam langkah berdasarkan standar ANSI/IEEE C37.106-1987

Tabel 2.1 Skema Pelepasan Beban Tiga Langkah

Step	Frequency Trip Point (Hz)	Percent of Load Shedding (%)	Fixed Time Delay (Cycle) on Relay
1	59.3	10	6
2	58.9	15	6
3	58.5	as require to arrest decline before 58.2	

Tabel 2.2 Skema Pelepasan Beban Enam Langkah

Step	Frequency Trip Point (Hz)	Percent of Load Shedding (%)	Fixed Time Delay (Cycle) on Relay
1	59,5	10	6
2	59,2	10	6
3	58,8	5	6
4	58,8	5	14
5	58,4	5	14

Menurut standar ANSI/IEEE C37.106-1987 terdapat dua skema yaitu skema pelepasan beban dengan 3 langkah dan 6 langkah. Standar ANSI/IEEE C37.106-1987 menggunakan frekuensi 60 Hz. Namun dalam tugas akhir kali ini menggunakan frekuensi 50 Hz [11]. Sehingga perlu mengubah standar ANSI/IEEE C37.106-1987 dalam bentuk % sehingga dapat digunakan untuk frekuensi 50 Hz. Dalam tugas akhir ini menggunakan pelepasan beban tiga langkah. Dalam pelepasan 3 langkah, jika terjadi gangguan yang membuat kekurangan suplai daya tidak harus dilakukan 3 langkah. Namun 3 langkah ini adalah maksimal pelepasan beban. Jika dengan 1 atau 2 langkah mampu membuat sistem menjadi stabil dan masih dalam standart yang ada, maka cukup *Load Shedding* 1 atau 2 langkah saja.

Pada *Load Shedding* 3 langkah, *Load Shedding* pertama dilakukan ketika frekuensi 98.83%, besar beban yang dilepas adalah 10% dari beban total, dan waktu CB membuka adalah 0,12 s. jika dengan *Load Shedding* pertama sistem belum stabil maka diperlukan *Load Shedding* kedua. Untuk *Load Shedding* kedua dilakukan ketika frekuensi 98.16%, besar beban yang dilepas adalah 15% dari beban total. Jika dengan dilakukannya *Load Shedding* tahap 2 sistem belum stabil, maka perlu dilakukan *Load Shedding* ketiga. *Load Shedding* ketiga dilakukan ketika frekuensi sistem 97,5 % dan besar beban yang dilepas disesuaikan dengan kekurangan suplai daya dari *Load Shedding* kedua. Dan frekuensinya tidak diijinkan turun hingga 97%. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada tabel 2.3:

Tabel 2.3 Skema Pelepasan Beban Tiga Langkah sistem 60 Hz dan 50 Hz

Step	Frequency Trip Point (Hz)		%	Percent of Load Shedding (%)	Fixed Time Delay (Cycles) on Relay
	Sistem 60 (Hz)	Sistem 50 (Hz)			
1	59.3	49.41	98.83	10	6
2	58.9	49.08	98.16	15	6
3	58.5	48.75	97.5	<i>As required to arrest decline before 58.2(97%) Hz</i>	



[Halaman Ini Sengaja Dikosongkan]

BAB 3

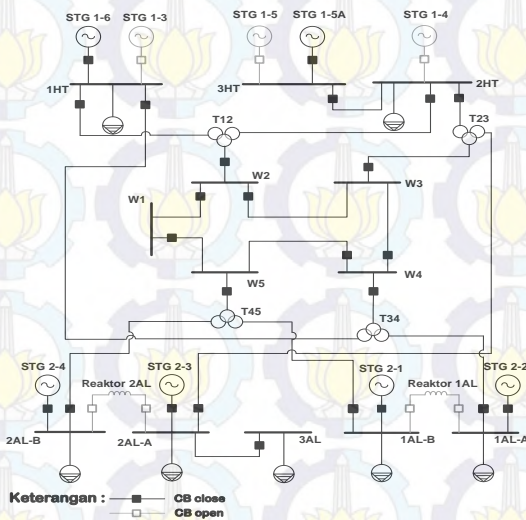
SISTEM KELISTRIKAN PT. PERTAMINA RU V BALIKPAPAN

3.1 Sistem Kelistrikan di PT. Pertamina RU V Balikpapan

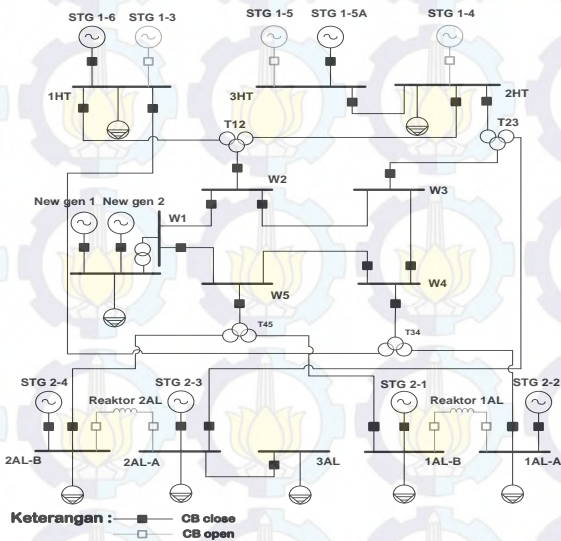
PT. PERTAMINA RU V Balikpapan merupakan pemasok BBM kedua terbesar setelah RU IV Cilacap. Maka untuk menjaga kontinuitas sistem kelistrikan yang ada diperlukan 8 pembangkit STG yang beroperasi dari 11 pembangkit STG yang ada, keenam pembangkit tersebut adalah STG 1-6, STG 1-5A, STG 2-4, STG 2-3, STG 2-1, dan STG 2-2, STG New 1, dan STG New 2. Terdapat pula dua unit pembangkit DTG yang dioperasikan *standby*. Semua unit pembangkit ini dipusatkan dalam 3 Power plant yaitu lima unit pada *Power Plant 1 (PPI)*, empat unit pada *Power Plant 2 (PP2)*, 2 unit pada *Power Plant Baru (PP3)*.

Sistem distribusi yang digunakan untuk menyalurkan daya dari pembangkitnya diinterkoneksi dalam 3 level tegangan yaitu 0,38 kV, 6,6 kV dan 33kV. Level tegangan 0,38 digunakan untuk mendistribusikan beban berkapasitas kecil ataupun beban-beban statis. Level tegangan 6,6 kV untuk mendistribusikan beban-beban berkapasitas besar yaitu motor berkapasitas besar. Sedangkan level tegangan 33 kV digunakan untuk menjaga keandalan sistem pada sistem sistem distribusi ring.

Akibat peningkatan permintaan konsumen akan bahan bakar minyak yang terus meningkat, maka PT. Pertamina melakukan penambahan beban dengan total beban 25 MW. Penambahan beban ini diikuti dengan penambahan 2 unit pembangkit STG baru dengan kapasitas masing-masing 15 MW yang akan diinterkonesikan pada sistem ring 33kV. Sistem kelistrikan PT. Pertamina RU V Balikpapan sebelum adanya penambahan pembangkit dan beban baru ditunjukkan oleh gambar 3.1. Sedangkan untuk sistem kelistrikan PT. Pertamina RU V Balikpapan setelah adanya penambahan generator dan beban baru ditunjukkan pada gambar 3.2



Gambar 3.1 Sistem Kelistrikan PT. Pertamina RU V Balikpapan tanpa Penambahan Beban



Gambar 3.2 Sistem Kelistrikan PT. Pertamina RU V Balikpapan dengan Penambahan Beban

3.2 Data Kelistrikan PT. Pertamina RU V Balikpapan

Jumlah total pembangkitan, pembebanan, dan *demand* dapat dilihat pada Tabel 3.1 :

Tabel 3.1 Jumlah Total Pembangkitan, Pembebanan, dan *Demand*

Keterangan	MW	MVA _r	MVA	%PF
<i>Source (swing bus)</i>	28,450	18,947	34,182	83,23 Lag
<i>Source (non swingbus)</i>	34,000	19,659	39,275	86,57 Lag
<i>Total Demand</i>	62,450	38,606	73,420	85,06 Lag
<i>Total Motor Load</i>	53,372	32,532	62,506	85,39 Lag
<i>Total Static Load</i>	8,819	5,578	10,435	84,51 Lag
<i>Apparent Losses</i>	0,253	0,393		

Jumlah total *demand* pada PT. Pertamina RU V Balikpapan adalah 62,450 MW, 38,606 Mvar, dan 73,420 MVA.

3.2.1 Kapasitas Pembangkitan PT. Pertamina RU V Balikpapan

Tabel 3.2 Data pembangkit

Power Plant	No.	ID Unit	Tegangan (kV)	Kapasitas (MW)
Power Plant I	1	STG 1-3	6,6	7,5
	2	STG 1-4	6,6	9
	3	STG 1-5	6,6	9
	4	STG 1-5A	6,6	9
	5	STG 1-6	6,6	9
	Total			43,5
Power Plant II	1	STG 2-1	6,6	8,4
	2	STG 2-2	6,6	12,8
	3	STG 2-3	6,6	12,8
	4	STG 2-4	6,6	12,8
	Total			46,8
Power Plant Baru	1	NewGen1	11	15
	2	NewGen2	11	15
	Total			30

3.2.2 Sistem Distribusi PT. Pertamina RU V Balikpapan

Sistem kelistrikan di PT. Pertamina RU V Balikpapan yaitu menggunakan penggabungan antara ring pada level tegangan 33 kV dan radial pada level tegangan 6,6 dan 0,38 kV. Sistem distribusi ring 33 kV

terdiri dari 5 bus yaitu W1, W2, W3, W4 dan W5. Selain itu ring bus ini juga digunakan untuk memperoleh keandalan sistem yang lebih baik. Pengintegrasian 2 unit pembangkit baru dengan sistem ring ini dibutuhkan *tie transformer* baru dengan kapasitas 30 MVA untuk menaikkan tegangan *output* generator 11 kV menjadi 33kV.

Dalam sistem distribusi PT. Pertamina RU V Balikpapan ditinjau pula dengan beberapa transformator lainnya sebelum masuk ke beban guna menurunkan tegangan. Tabel 3.3 adalah data dari transformator-transformator tersebut:

Tabel 3.3 Data Transformator Distribusi di PT. Pertamina RU V Balikpapan

No	ID	MVA	kV	%Z	Hubungan
1.	HSTR1	1	6,6/0,4	5,75	delta/bye
2.	HSTR2	1	6,6/0,4	5,75	delta/bye
3.	HSTR3	1	6,6/0,4	5,75	delta/bye
4.	TR61A	1,6	6,6/0,4	5,75	delta/bye
5.	TR61B	1,6	6,6/0,4	5	delta/bye
6.	TR61C	1	6,6/0,4	5	delta/bye
7.	TR61D	1	6,6/0,4	5	delta/bye
8.	TR61E	1	6,6/0,4	5	delta/bye
9.	TR61F	1	6,6/0,4	5	delta/bye
10.	TR62A	1,6	6,6/0,4	6,25	delta/bye
11.	TR62B	1,6	6,6/0,4	6,25	delta/bye
12.	TR63A	1,6	6,6/0,4	6,25	delta/bye
13.	TR63B	1,6	6,6/0,4	6,25	delta/bye
14.	TR64A	1	6,6/0,4	5	delta/bye
15.	TR64B	1	6,6/0,4	5	delta/bye
16.	TR65A	1	6,6/0,4	5	delta/bye
17.	TR65B	1	6,6/0,4	5	delta/bye
18.	TR66A	1,6	6,6/0,4	6,25	delta/bye
19.	TR66B	1,6	6,6/0,4	6,25	delta/bye
20.	TR67A	1,6	6,6/0,4	6,25	delta/bye
21.	TR67B	1,6	6,6/0,4	6,25	delta/bye
22.	TR68A	1	6,6/0,4	5	delta/bye
23.	TR68B	1	6,6/0,4	5	delta/bye

Sedangkan berikut adalah data *tie-transformator* yang digunakan untuk menghubungkan antar utility tersebut:

Tabel 3.4 Data *Tie-Transformer* Distribusi di PT. Pertamina RU V Balikpapan

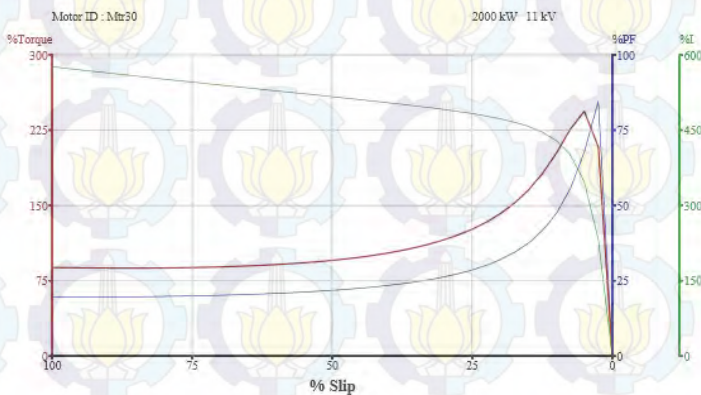
No	ID	MVA	kV	%Z	Hubungan
1.	T12	16	33/6,6/6,6	13,1	wye/delta/delta
2.	T23	16	33/6,6/6,6	13,1	wye/delta/delta
3.	T34	16	33/6,6/6,6	13,1	wye/delta/delta
4.	T45	16	33/6,6/6,6	13,1	wye/delta/delta

3.2.3 Motor Terbesar PT. Pertamina RU V Balikpapan

Pada analisa kestabilan transient untuk kasus motor *starting*, beban motor terbesar pabrik perlu di perhitungkan. Motor terbesar memiliki rating tegangan 6.6kV dengan kapasitas 1890 kW. Karakteristik motor terbesar dapat dilihat pada tabel 3.5 dan gambar 3.3:

Tabel 3.5 Data Spesifikasi Motor GM-3-01C

Karakteristik	Setting
LRC	650%
PF	14%
1/2 cy Xsc	15.385%
1.5-4 cy Xsc	23.077%
X/R	7.073



Gambar 3.2 Karakteristik Motor GM-3-01C

Gambar 3.2 Menunjukkan kurva karakteristik motor induksi yang digunakan di PT. Pertamina RU V. Balikpapan. Data kurva karakteristik

ini diperlukan untuk Studi Kestabilan transien khususnya pada kasus motor starting. Dari kurva ini akan didapatkan berapa besar torsi, arus, PF yang dibutuhkan saat motor starting, sehingga program dapat memberikan respon frekuensi, tegangan, dan sudut rotor sistem ketika terjadi perubahan ini.

BAB 4

SIMULASI DAN ANALISIS KESTABILAN TRANSIEN DI PT. PERTAMINA RU V BALIKPAPAN

4.1. Pemodelan Sistem Kelistrikan

Berdasarkan data-data yang ada dilakukan pemodelan dalam bentuk *single line diagram* dari sistem kelistrikan di PT. Pertamina RU V Balikpapan dalam software ETAP 12.6. Selanjutnya akan dilakukan simulasi dan analisis kestabilan transien dengan beberapa kasus kemungkinan terjadinya gangguan. Pada tugas akhir ini analisis dilakukan ketika terjadi *generator outage*, *short circuit*, dan *motor starting*.

4.2. Studi Kasus Kestabilan Transien

Pada simulasi ini dilakukan analisis kestabilan transien dan mekanisme pelepasan beban di PT. Pertamina RU V Balikpapan akibat generator *outage*, *short circuit*, motor *starting*. Parameter-parameter yang perlu diperhatikan dalam tugas akhir ini adalah respon dari frekuensi, tegangan, dan sudut rotor pada sistem.

Studi kasus gangguan yang digunakan pada simulasi ini antara lain sebagai berikut:

1. *Generator outage*: pada kasus ini terdapat satu ataupun dua generator yang tiba-tiba terlepas dari sistem saat sedang terinterkoneksi.
2. *Short circuit*: pada kasus ini terjadi gangguan hubung singkat pada bus SS69MA dengan level tegangan 0,38 kV; bus 1AL-B dengan level tegangan 6,6 kV; bus W2 dengan level tegangan 33 kV.
3. *Motor starting*: pada kasus ini terjadi *starting* motor terbesar 1890 kW saat sistem sedang beroperasi. Motor yang di *starting* adalah GM-3-01C.

Tabel 4.1. Studi Kasus Kestabilan Transien

No	Kasus	Operasi Pembangkitan	Keterangan
1.	Gen 1-5A OFF	7	Generator 1-5A <i>outage</i> dari sistem
2.	Gen 2-1 OFF	7	Generator 2-1 <i>outage</i> dari sistem
3.	Gen 1-5A + 1-6 OFF	6	Generator 1-5A dan 1-6 <i>outage</i> dari sistem
	Gen 1-5A + 1-6 OFF + LS1		<i>Load Shedding</i> tahap 1 sebesar 10% dengan Frekuensi
4.	Gen 2-1 + 2-2 OFF	6	Generator 2-1 dan 2-2 <i>outage</i> dari sistem
	Gen 2-1 + 2-2 OFF +LS1		<i>Load Shedding</i> tahap 1 sebesar 10% dengan Frekuensi
5.	Gen 1-6+2-1 OFF	6	Generator 1-6 dan 2-1 <i>outage</i> dari sistem
	Gen 1-6 + 2-1 OFF + LS1		<i>Load Shedding</i> tahap 1 sebesar 10% dengan Frekuensi
6.	Gen New 1+1-5A OFF	6	Generator STG new 1 dan 1-5A <i>outage</i> dari sistem
	Gen New 1+1-5A OFF+LS1		<i>Load Shedding</i> tahap 1 sebesar 10% dengan Frekuensi
	Gen New 1+1-5A OFF+LS2		<i>Load Shedding</i> tahap 2 sebesar 15% dengan Frekuensi
7.	Gen Generator STG New 2+2-1 OFF	6	Generator Generator STG New 2 dan 2-1 <i>outage</i> dari sistem
	Gen Generator STG New 2+2-1 OFF+LS1		<i>Load Shedding</i> tahap 1 sebesar 10% dengan Frekuensi
	Gen Generator STG New 2+2-1 OFF+LS2		<i>Load Shedding</i> tahap 2 sebesar 15% dengan Frekuensi
8.	Generator STG New 1+Generator STG New 2	6	Generator New 1 dan Generator STG New 2 <i>outage</i> dari sistem
	Generator STG New 1+Generator STG New 2+LS1		<i>Load Shedding</i> tahap 1 sebesar 10% dengan Frekuensi
	Generator STG New 1+Generator STG New 2+LS2		<i>Load Shedding</i> tahap 2 sebesar 15% dengan Frekuensi
	Generator STG New 1+Generator STG New 2+LS3		<i>Load Shedding</i> tahap 3 sebesar 25% dengan Frekuensi
9.	SC 0.38 kV	8	Gangguan hubung singkat di bus SS69MA dilanjutkan dengan <i>CB</i> open setelah gangguan sesuai dengan sistem proteksinya
10.	SC 6.6 kV	8	Gangguan hubung singkat di bus 1AL-B dilanjutkan dengan <i>CB</i> open setelah gangguan sesuai dengan sistem proteksinya

Tabel 4.1. Studi Kasus Kestabilan Transien (lanjutan)

No	Kasus	Operasi Pembangkitan	Keterangan
11.	SC 11 kV	8	Gangguan hubung singkat di bus Bus 63 dilanjutkan dengan <i>CB</i> open setelah gangguan sesuai dengan sistem proteksinya
12.	SC 33 kV	8	Gangguan hubung singkat di bus w2 dilanjutkan dengan <i>CB</i> open setelah gangguan sesuai dengan sistem proteksinya
13.	<i>Motor Starting</i>	8	<i>Motor Starting</i> (GM-3-01-C)(1890kW) menggunakan DOL

Pada kasus gangguan generator *outage*, bus yang digunakan sebagai parameter kestabilan transien sistem adalah:

- Bus W2 merupakan bus yang mewakili tegangan 33 kV di sistem ring.
- Bus 1HT merupakan bus yang mewakili tegangan 6,6 kV pada *power plant 1* (kasus 3 dan 5).
- Bus 3HT merupakan bus yang mewakili tegangan 6,6 kV pada *power plant 1* (kasus 1, 2, 4, 6, 7, dan 8).
- Bus 2AL-B merupakan bus yang mewakili tegangan 6,6 kV pada *power plant 2* (kasus 1, 3, dan 7).
- Bus 1AL-B merupakan bus yang mewakili tegangan 6,6 kV pada *power plant 2* (kasus 2, 4, 5, 6, dan 8).

Pada kasus gangguan *3-phase short circuit* bus yang digunakan sebagai parameter kestabilan transien adalah:

- Bus W2 merupakan bus yang mewakili tegangan 33 kV di sistem ring.
- Bus 1HT merupakan bus yang mewakili tegangan 6,6 kV pada *power plant 1*.
- Bus 1AL-B merupakan bus yang mewakili tegangan 6,6 kV pada *power plant 2*.
- Bus 2AL-B merupakan bus yang mewakili tegangan 6,6 kV pada *power plant 2*.
- Bus SS69MB merupakan bus yang mewakili tegangan 0,38 kV.
- Bus SS69MA merupakan bus yang mewakili tegangan 0,38 kV.

Pada kasus gangguan motor *starting*, bus yang digunakan sebagai parameter kestabilan transien adalah bus SS61MB yang terhubung langsung dengan motor yang akan *starting*. Dalam kasus ini Bus 2AL-B, 3HT, dan W2 juga dijadikan parameter untuk melihat apa dampak kestabilan transien dari *motor starting* pada masing-masing level tegangan.

4.3 Hasil Simulasi Kestabilan Transien, Mekanisme Load Shedding

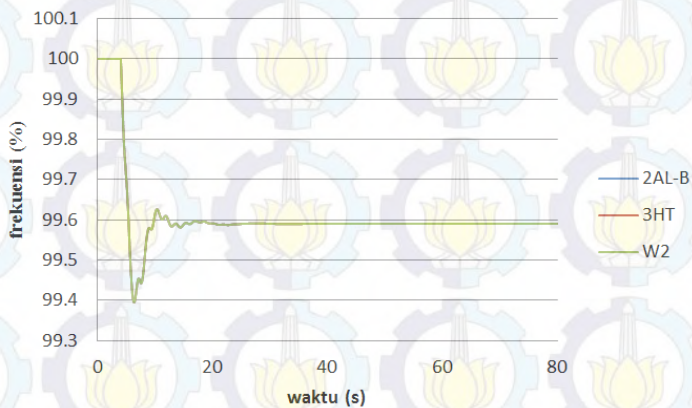
Pada sub ini akan dijelaskan mengenai hasil dari analisis kestabilan transien untuk tiap studi kasus gangguan yang telah ditentukan. Hasil yang akan dianalisis meliputi respon frekuensi dan tegangandari masing-masing bus yang telah ditentukan sebelumnya, dan juga sudut rotor generator yang terinterkoneksi ke sistem.

4.3.1. Simulasi Kestabilan Transien Generator Outage

Pada sub bab 4.3.1. akan dilakukan simulasi kestabilan transien untuk studi kasus generator *outage*.

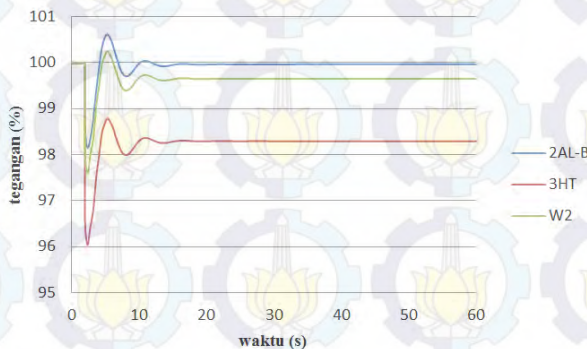
4.3.1.1 Studi Kasus STG 1-5A OFF: Generator STG 1-5A Outage dari Sistem (t=2s)

Pada studi kasus ini akan ditampilkan hasil dari simulasi dan analisis kestabilan transien saat generator STG 1-5A OFF di sisi *Power plant 1* dan 7 generator lainnya ON pada sistem kelistrikan PT. Pertamina RU V Balikpapan. Generator disimulasikan *outage* saat 2 detik setelah sistem bekerja dengan total waktu simulasi selama 60 detik.



Gambar 4.1 Respon Frekuensi Saat Generator STG-1-5A *Outage* dari Sistem

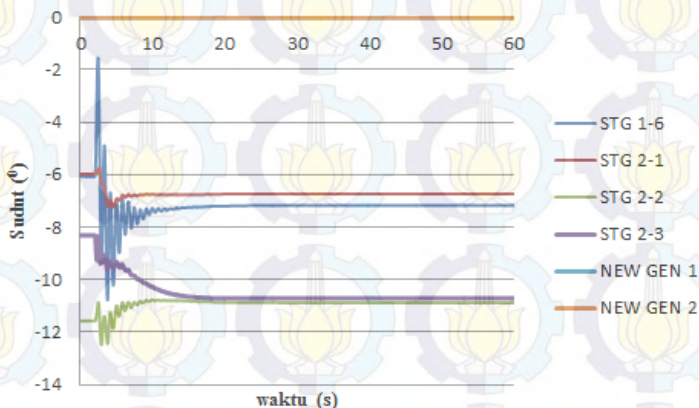
Pada Gambar 4.1 menunjukkan bahwa frekuensi bus pada masing-masing level tegangan mengalami penurunan, akan tetapi sistem masih dapat mempertahankan kestabilannya. Penurunan frekuensi terendah mencapai 99,39% pada detik ke 6,202 s. Penurunan frekuensi terjadi karena suplai daya yang hilang dari generator STG-1-5A sebesar 5 MW. Sistem kembali *steady state* pada 99,59% dari frekuensi normal. Berdasarkan kepada standar ANSI/IEEE C37.106-1987 penurunan frekuensi yang terjadi pada studi kasus ini masih diperkenankan.



Gambar 4.2 Respon Tegangan saat Generator STG-1-5A *Outage* dari Sistem

Dari gambar 4.2 menunjukkan bahwa tegangan pada masing-masing bus mengalami penurunan saat detik ke-2. Bus 2AL-B

mengalami penurunan tegangan hingga 98,09% dan kembali stabil pada 99,95%. Bus 3HT mengalami penurunan tegangan hingga 96,04% dan kembali stabil pada 98,28%. Bus W2 mengalami penurunan tegangan hingga 97,58% dan kembali stabil pada 99,64%. Penurunan tegangan yang terjadi karena beban-beban pada sistem tidak tersuplai secara penuh.



Gambar 4.3 Respon Sudut Rotor saat Generator STG-1-5A *Outage* dari Sistem

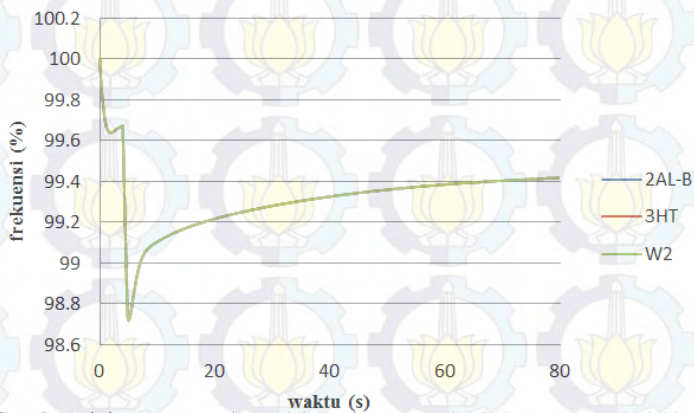
Gambar 4.3 menunjukkan respon sudut rotor relatif terhadap swing generator dari masing-masing generator pada saat STG 1-5A *outage*. Dari gambar tersebut, terlihat masing-masing generator mengalami osilasi dengan titik terendah saat detik ke-2. Generator STG 1-6 mengalami perubahan sudut rotor hingga $-9,32^{\circ}$ dan kembali stabil pada $-7,17^{\circ}$. Generator STG 2-1 mengalami perubahan sudut rotor hingga $-6,4^{\circ}$ dan kembali stabil pada $-7,17^{\circ}$. Generator STG 2-2 mengalami perubahan sudut rotor hingga $-12,49^{\circ}$ dan kembali stabil pada $-7,17^{\circ}$. Generator STG 2-3 mengalami perubahan sudut rotor hingga $-9,34^{\circ}$ dan kembali stabil pada $-7,17^{\circ}$. Generator STG New 1 relatif stabil dan tidak mengalami perubahan. Generator STG New 2 relatif stabil dan tidak mengalami perubahan.

Berdasarkan data simulasi respon frekuensi, tegangan dan sudut rotor diatas dapat disimpulkan bahwa sistem masih dapat mempertahankan kestabilannya ketika terjadi kasus generator STG 1-5A *outage*. Terjadi Osilasi dari masing-masing respon tetapi menurut

standar IEEE Std C37.106-2003, penurunan ataupun kenaikan yang terjadi masih diperkenankan.

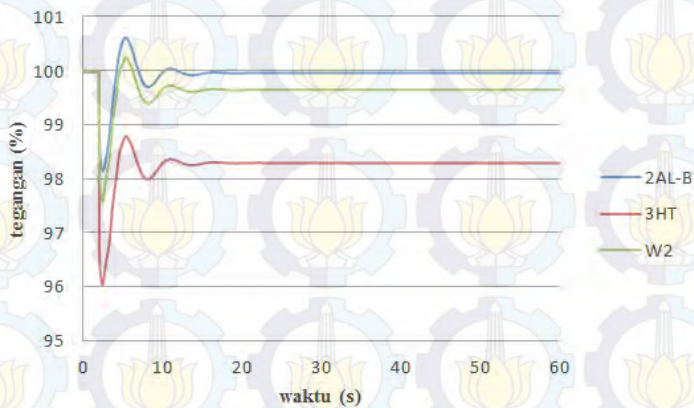
4.3.1.2 Studi Kasus STG 2-1 OFF: Generator STG 2-1 Outage dari Sistem ($t=2s$)

Pada studi kasus ini akan ditampilkan hasil dari simulasi dan analisis kestabilan transien saat generator STG 2-1 OFF di sisi *Power plant* 2 dan 7 generator lainnya ON pada sistem kelistrikan PT. Pertamina RU V Balikpapan. Generator disimulasikan *outage* saat 2 detik setelah sistem bekerja dengan total waktu simulasi selama 60 detik.



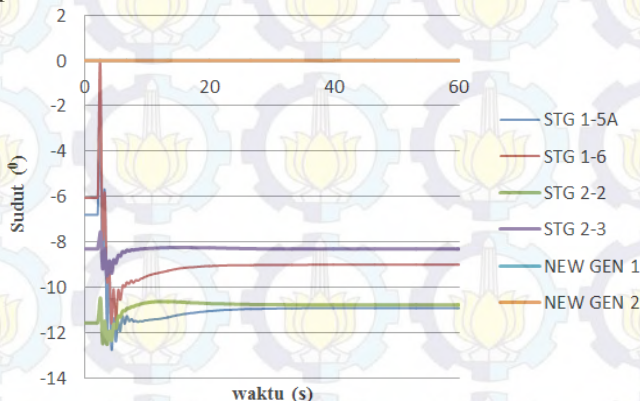
Gambar 4.4 Respon Frekuensi Saat Generator STG-2-1 Outage dari Sistem

Pada Gambar 4.4 menunjukkan bahwa frekuensi bus pada masing-masing level tegangan mengalami penurunan, akan tetapi sistem masih dapat mempertahankan kestabilannya. Penurunan frekuensi terendah mencapai 98,98% pada detik ke 4,581 s. Penurunan frekuensi terjadi karena suplai daya yang hilang dari generator STG-2-1 sebesar 8 MW. Sistem kembali *steady state* pada 99,29% dari frekuensi normal. Berdasarkan kepada standar ANSI/IEEE C37.106-1987 penurunan frekuensi yang terjadi pada studi kasus ini masih diperkenankan.



Gambar 4.5 Respon Tegangan saat Generator STG-2-1 *Outage* dari Sistem

Dari gambar 4.5 menunjukkan bahwa tegangan pada masing-masing bus mengalami penurunan saat detik ke-2. Bus 1AL-B mengalami penurunan tegangan hingga 91,96% dan kembali stabil pada 95,88%. Bus 3HT mengalami penurunan tegangan hingga 96,77% dan kembali stabil pada 100,00%. Bus W2 mengalami penurunan tegangan hingga 96,14% dan kembali stabil pada 99,64%. Penurunan tegangan yang terjadi karena beban-beban pada sistem tidak tersuplai secara penuh.



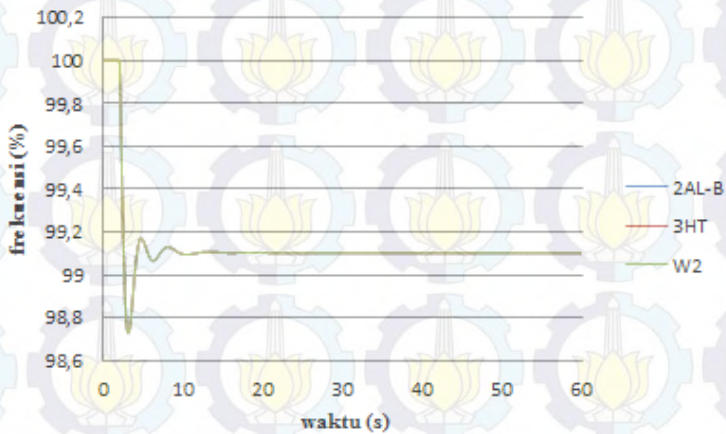
Gambar 4.6 Respon Sudut Rotor saat Generator STG-2-1 *Outage* dari Sistem

Gambar 4.6 menunjukkan respon sudut rotor relatif terhadap swing generator dari masing-masing generator pada saat STG 2-1 *outage*. Dari gambar tersebut terlihat masing-masing generator mengalami osilasi dengan titik terendah saat antara detik ke-2 sampai ke-3. Generator STG 1-5A mengalami perubahan sudut rotor hingga $-10,93^0$ dan kembali stabil pada $-7,17^0$. Generator STG 1-6 mengalami perubahan sudut rotor hingga $-6,4^0$ dan kembali stabil pada $-9,01^0$. Generator STG 2-2 mengalami perubahan sudut rotor hingga $-12,5^0$ dan kembali stabil pada $-10,78^0$. Generator STG 2-3 mengalami perubahan sudut rotor hingga $-9,2^0$ dan kembali stabil pada $-8,32^0$. Generator STG New 1 relatif stabil dan tidak mengalami perubahan. Generator STG New 2 relatif stabil dan tidak mengalami perubahan.

Berdasarkan data simulasi respon frekuensi, tegangan dan sudut rotor diatas dapat disimpulkan bahwa sistem masih dapat mempertahankan kestabilannya ketika terjadi kasus generator STG 2-1 *outage*. Terjadi Osilasi dari masing-masing respon tetapi menurut standar IEEE Std C37.106-2003, penurunan ataupun kenaikan yang terjadi masih diperkenankan.

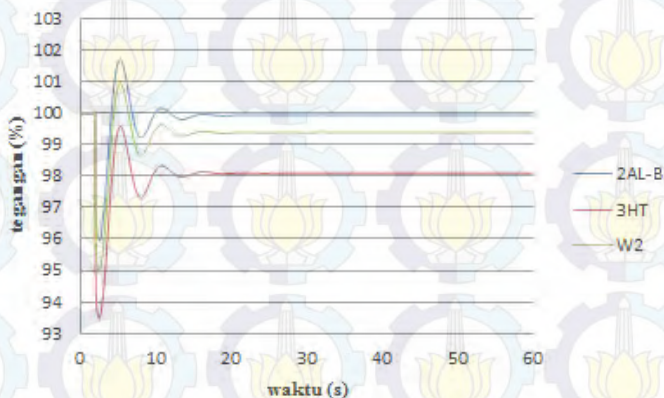
4.3.1.3 Studi Kasus STG 1-5A + 1-6 OFF: Generator STG 1-5A dan Generator 1-6 Outage dari Sistem (t=2s)

Pada studi kasus ini akan ditampilkan hasil dari simulasi dan analisis kestabilan transien saat generator STG 1-5A dan STG 1-6 *OFF* di sisi *Power plant 1* dan 6 generator lainnya *ON* pada sistem kelistrikan PT. Pertamina RU V Balikpapan. Generator disimulasikan *outage* saat 2 detik setelah sistem bekerja dengan total waktu simulasi selama 60 detik.



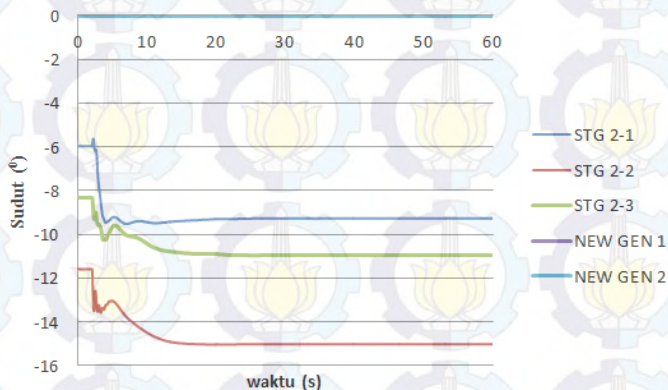
Gambar 4.7 Respon Frekuensi Saat Generator STG 1-5A dan STG 1-6 *Outage* dari Sistem

Pada Gambar 4.7 menunjukkan bahwa frekuensi bus pada masing-masing level tegangan mengalami penurunan, akan tetapi sistem masih dapat mempertahankan kestabilannya. Penurunan frekuensi terendah mencapai 98,73% pada detik ke 3,04 s. Penurunan frekuensi terjadi karena suplai daya yang hilang dari generator STG 1-5A dan STG 1-6 dengan total sebesar 10 MW. Sistem kembali *steady state* pada 99,10% dari frekuensi normal. Berdasarkan kepada standar ANSI/IEEE C37.106-1987 penurunan frekuensi yang terjadi pada studi kasus ini tidak diperkenankan, sehingga dibutuhkan mekanisme *Load shedding*.



Gambar 4.8 Respon Tegangan saat Generator Generator STG 1-5A dan STG 1-6 *Outage* dari Sistem

Dari gambar 4.8 menunjukkan bahwa tegangan pada masing-masing bus mengalami penurunan saat detik ke-2. Bus 2AL-B mengalami penurunan tegangan hingga 95,98% dan kembali stabil pada 99,94%. Bus 3HT mengalami penurunan tegangan hingga 93,47% dan kembali stabil pada 98,09%. Bus W2 mengalami penurunan tegangan hingga 94,96% dan kembali stabil pada 99,38%. Penurunan tegangan yang terjadi karena beban-beban pada sistem tidak tersuplai secara penuh.



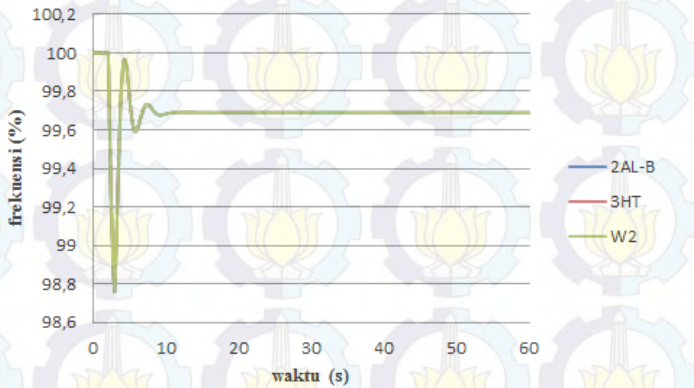
Gambar 4.9 Respon Sudut Rotor saat Generator Generator STG 1-5A dan STG 1-6 *Outage* dari Sistem

Gambar 4.9 menunjukkan respon sudut rotor relatif terhadap swing generator dari masing-masing generator pada saat STG 1-5A dan STG 1-6 *outage*. Dari gambar tersebut, terlihat masing-masing generator mengalami osilasi sudut rotor antara 0^0 sampai -3^0 . Generator STG 2-1 mengalami perubahan sudut rotor sekitar -3^0 dan kembali stabil pada $-9,26^0$. Generator STG 2-2 mengalami perubahan sudut rotor sekitar -2^0 dan kembali stabil pada $-15,02^0$. Generator STG 2-3 mengalami perubahan sudut rotor sekitar -2^0 dan kembali stabil pada $-10,95^0$. Generator STG NEW 1 relatif stabil dan tidak mengalami perubahan. Generator STG NEW 2 relatif stabil dan tidak mengalami perubahan.

Berdasarkan data simulasi respon tegangan dan sudut rotor diatas dapat disimpulkan bahwa sistem masih dapat mempertahankan kestabilannya, akan tetapi respon frekuensi menunjukan bahwa sistem mengalami penurunan yang masih tidak diperkenankan berdasarkan dari standar ANSI/IEEE C37.106-1987. Sehingga dibutuhkan mekanisme *Load shedding* tahap 1.

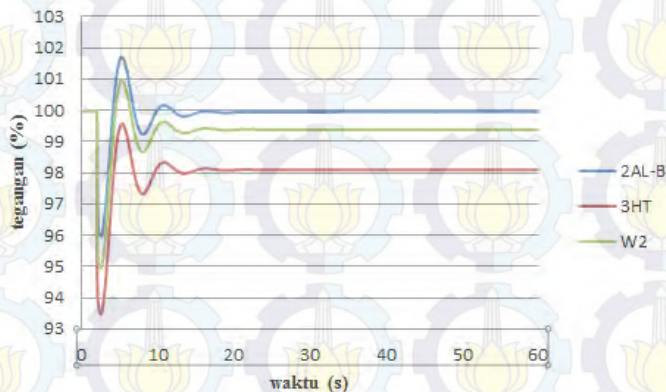
4.3.1.4 Studi Kasus STG 1-5A + 1-6 OFF + LSI: Generator STG 1-5A dan Generator 1-6 Outage dari Sistem ($t=2s$) dengan Load Shedding 1

Pada studi kasus ini akan ditampilkan hasil dari simulasi dan analisis kestabilan transien saat generator STG 1-5A dan STG 1-6 OFF di sisi *Power plant 1* dan 6 generator lainnya ON diikuti dengan mekanisme pelepasan *load shedding* tahap 1 pada sistem kelistrikan PT. Pertamina RU V Balikpapan. Generator disimulasikan *outage* saat 2 detik setelah sistem bekerja dengan total waktu simulasi selama 60 detik. *Load shedding* tahap 1 dilakukan pada saat 2,88 s (2,76 s waktu pada saat sistem mengalami penurunan frekuensi minimal sesuai standar pelepasan beban 3 langkah + 0,12 s delay waktu). Standar *load shedding* yang digunakan pada tugas akhir ini adalah *load shedding* tiga langkah berdasar standar ANSI/IEEE C37.106-1987.



Gambar 4.10 Respon Frekuensi Saat Generator STG 1-5A dan STG 1-6 *Outage* dari Sistem dengan Mekanisme *Load Shedding* Tahap 1

Pada Gambar 4.10 menunjukkan bahwa frekuensi bus pada masing-masing level tegangan mengalami penurunan, akan tetapi sistem masih dapat mempertahankan kestabilannya. Penurunan frekuensi terendah mencapai 98,75% pada detik ke 2,90 s. Penurunan frekuensi terjadi karena suplai daya yang hilang dari generator STG 1-5A dan STG 1-6 dengan total sebesar 10 MW. Sistem kembali *steady state* pada 99,69% dari frekuensi normal. Berdasarkan kepada standar ANSI/IEEE C37.106-1987 penurunan frekuensi yang terjadi pada studi kasus ini masih diperkenankan.



Gambar 4.11 Respon Tegangan saat Generator Generator STG 1-5A dan STG 1-6 *Outage* dari Sistem dengan Mekanisme *Load Shedding* Tahap 1

Dari gambar 4.11 menunjukkan bahwa tegangan pada masing-masing bus mengalami penurunan saat detik ke-2. Bus 2AL-B mengalami penurunan tegangan hingga 95,96% dan kembali stabil pada 99,92%. Bus 3HT mengalami penurunan tegangan hingga 93,47% dan kembali stabil pada 98,08%. Bus W2 mengalami penurunan tegangan hingga 94,98% dan kembali stabil pada 99,36%. Penurunan tegangan yang terjadi karena beban-beban pada sistem tidak tersuplai secara penuh.



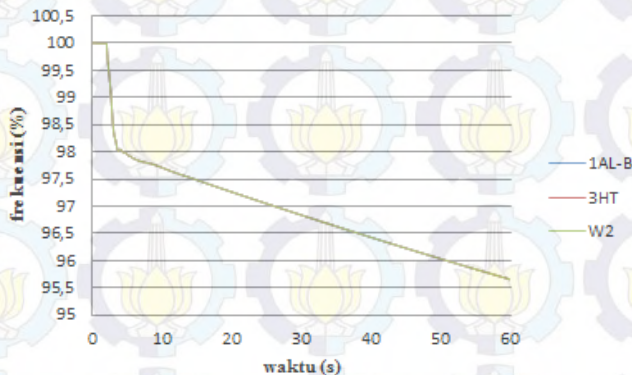
Gambar 4.12 Respon Sudut Rotor saat Generator Generator STG 1-5A dan STG 1-6 *Outage* dari Sistem dengan Mekanisme *Load Shedding* Tahap 1

Gambar 4.12 menunjukkan respon sudut rotor relatif terhadap swing generator dari masing-masing generator pada saat 1-5A dan STG 1-6 *outage*. Dari gambar tersebut, terlihat masing-masing generator mengalami osilasi dengan titik terendah saat antara detik ke-2 sampai ke-4. Generator STG 2-1 mengalami perubahan sudut rotor hingga $-8,12^{\circ}$ dan kembali stabil pada $-5,33^{\circ}$. Generator STG 2-2 mengalami perubahan sudut rotor hingga $-13,53^{\circ}$ dan kembali stabil pada $-12,64^{\circ}$. Generator STG 2-3 mengalami perubahan sudut rotor hingga $-12,5^{\circ}$ dan kembali stabil pada $-9,45^{\circ}$. Generator STG NEW 1 relatif stabil dan tidak mengalami perubahan. Generator STG NEW 2 relatif stabil dan tidak mengalami perubahan.

Berdasarkan data simulasi respon frekuensi, tegangan dan sudut rotor diatas dapat disimpulkan bahwa sistem masih dapat mempertahankan kestabilannya ketika terjadi kasus generator STG 1-5A dan STG 1-6 *outage*. Terjadi Osilasi dari masing-masing respon tetapi menurut standar IEEE Std C37.106-2003, penurunan ataupun kenaikan yang terjadi masih diperkenankan.

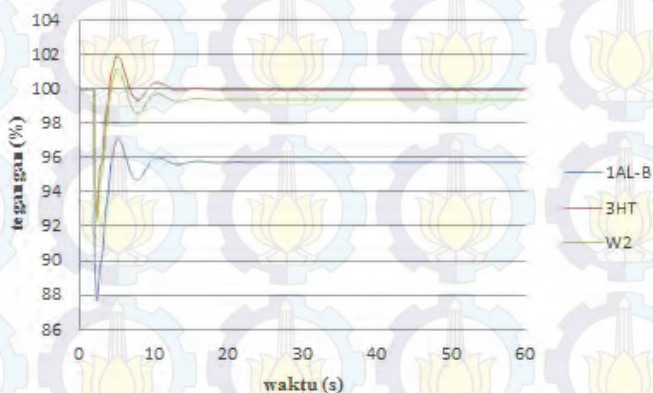
4.3.1.5 Studi Kasus STG 2-1 + 2-2 OFF: Generator STG 2-1 dan Generator 2-2 Outage dari Sistem (t=2s)

Pada studi kasus ini akan ditampilkan hasil dari simulasi dan analisis kestabilan transien saat generator STG 2-1 dan STG 2-2 OFF di sisi *Power plant* 2 dan 6 generator lainnya ON pada sistem kelistrikan PT. Pertamina RU V Balikpapan. Generator disimulasikan *outage* saat 2 detik setelah sistem bekerja dengan total waktu simulasi selama 60 detik.



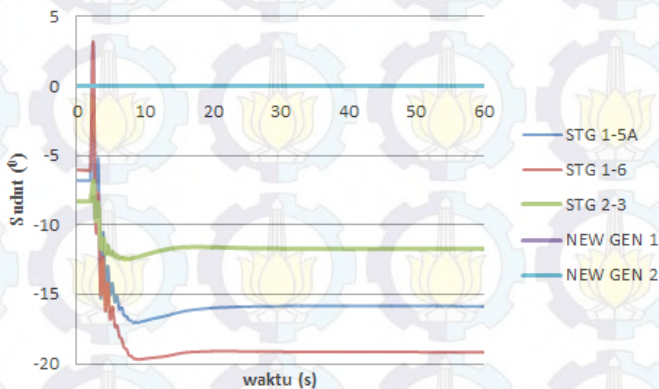
Gambar 4.13 Respon Frekuensi Saat Generator STG 2-1 dan STG 2-2 *Outage* dari Sistem

Pada Gambar 4.13 menunjukkan bahwa frekuensi bus pada masing-masing level tegangan mengalami penurunan terus-menerus dan sistem tidak dapat mempertahankan kestabilannya. Penurunan frekuensi terjadi karena suplai daya yang hilang dari generator STG 2-1 dan STG 2-2 dengan total sebesar 16 MW. Pada akhir waktu simulasi yaitu 60s frekuensi masih terus turun, sehingga ketika sistem mengalami gangguan seperti studi kasus ini tidak akan didapatkan kondisi *steady state*. Berdasarkan kepada standar ANSI/IEEE C37.106-1987 penurunan frekuensi yang terjadi pada studi kasus ini tidak diperkenankan, sehingga dibutuhkan mekanisme *Load shedding* tahap 1.



Gambar 4.14 Respon Tegangan Saat Generator STG 2-1 dan STG 2-2 *Outage* dari Sistem

Dari gambar 4.14 menunjukkan bahwa tegangan pada masing-masing bus mengalami penurunan saat detik ke-2. Bus 1AL-B mengalami penurunan tegangan hingga 87,63% dan kembali stabil pada 95,72%. Bus 3HT mengalami penurunan tegangan hingga 92,72% dan kembali stabil pada 99,93%. Bus W2 mengalami penurunan tegangan hingga 92,30% dan kembali stabil pada 99,38%. Penurunan tegangan yang terjadi karena beban-beban pada sistem tidak tersuplai secara penuh.



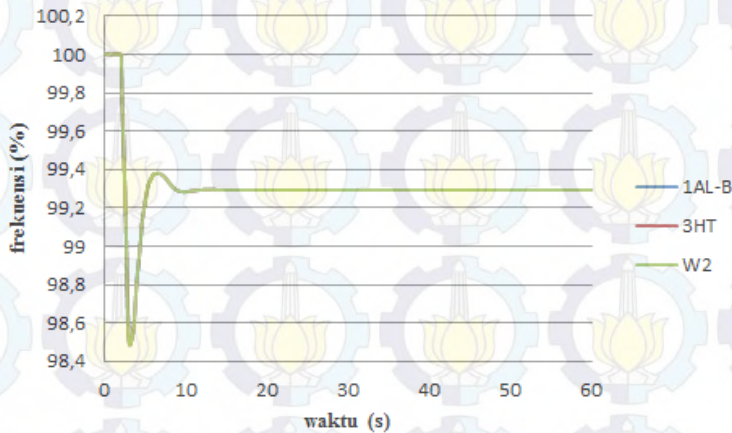
Gambar 4.15 Respon Sudut Rotor Saat Generator STG 2-1 dan STG 2-2 *Outage* dari Sistem

Gambar 4.15 menunjukkan respon sudut rotor relatif terhadap swing generator dari masing-masing generator pada saat STG 2-1 dan STG 2-2 *outage*. Dari gambar tersebut, terlihat masing-masing generator mengalami osilasi sudut rotor antara 0^0 sampai -13^0 . Generator STG 1-5A mengalami perubahan sudut rotor sekitar -11^0 dan kembali stabil pada $-15,85^0$. Generator STG 1-6 mengalami perubahan sudut rotor sekitar -9^0 dan kembali stabil pada $-19,17^0$. Generator STG 2-3 mengalami perubahan sudut rotor sekitar -2^0 dan kembali stabil pada $-11,73^0$. Generator STG NEW 1 relatif stabil dan tidak mengalami perubahan. Generator STG NEW 2 relatif stabil dan tidak mengalami perubahan.

Berdasarkan data simulasi respon tegangan dan sudut rotor diatas dapat disimpulkan bahwa sistem masih dapat mempertahankan kestabilannya, akan tetapi respon frekuensi menunjukan bahwa sistem mengalami penurunan yang masih tidak diperkenankan berdasarkan dari standar ANSI/IEEE C37.106-1987. Sehingga dibutuhkan mekanisme *Load shedding* tahap 1.

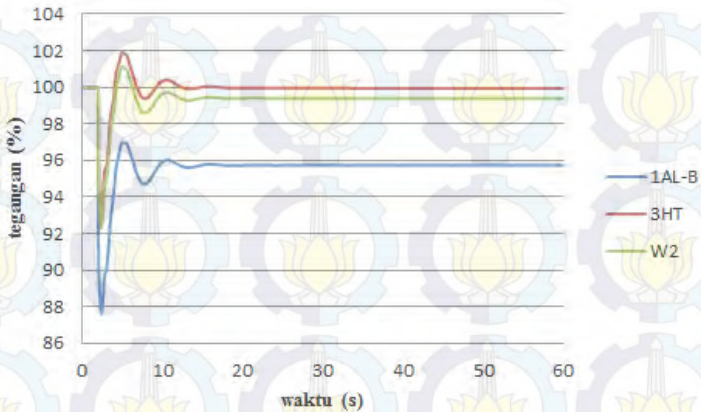
4.3.1.6 Studi Kasus STG 2-1A + 2-2 OFF + LSI: Generator STG 2-1 dan Generator 2-2 Outage dari Sistem ($t=2s$) dengan Load Shedding 1

Pada studi kasus ini akan ditampilkan hasil dari simulasi dan analisis kestabilan transien saat STG 2-1 dan STG 2-2 OFF di sisi *Power plant* 2 dan 6 generator lainnya ON diikuti dengan mekanisme pelepasan *load shedding* tahap 1 pada sistem kelistrikan PT. Pertamina RU V Balikpapan. Generator disimulasikan *outage* saat 2 detik setelah sistem bekerja dengan total waktu simulasi selama 60 detik. *Load shedding* tahap 1 dilakukan pada saat 2,88 s (2,76 s waktu pada saat sistem mengalami penurunan frekuensi minimal sesuai standar pelepasan beban 3 langkah + 0,12 s delay waktu). Standar *load shedding* yang digunakan pada tugas akhir ini adalah *load shedding* tiga langkah berdasar standar ANSI/IEEE C37.106-1987.



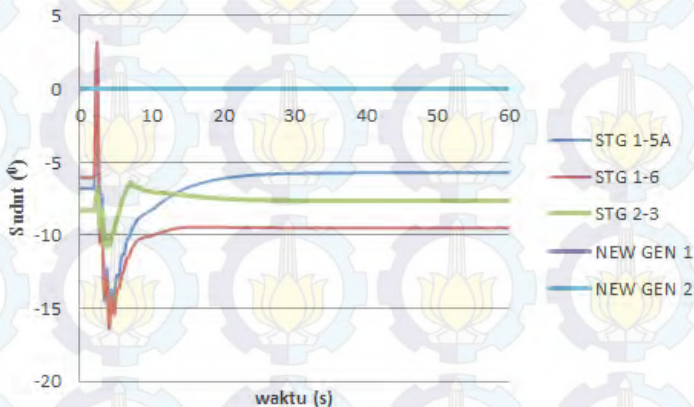
Gambar 4.16 Respon Frekuensi Saat Generator STG 2-1 dan STG 2-2 *Outage* dari Sistem dengan Mekanisme *Load Shedding* Tahap 1

Pada Gambar 4.16 menunjukkan bahwa frekuensi bus pada masing-masing level tegangan mengalami penurunan, akan tetapi sistem masih dapat mempertahankan kestabilannya. Penurunan frekuensi terendah mencapai 98,49% pada detik ke 2,99 s. Penurunan frekuensi terjadi karena suplai daya yang hilang dari generator STG 2-1 dan STG 2-2 dengan total sebesar 16 MW. Sistem kembali *steady state* pada 99,29% dari frekuensi normal. Berdasarkan kepada standar ANSI/IEEE C37.106-1987 penurunan frekuensi yang terjadi pada studi kasus ini masih diperkenankan.



Gambar 4.17 Respon Tegangan saat Generator STG 2-1 dan STG 2-2 *Outage* dari Sistem dengan Mekanisme *Load Shedding* Tahap 1

Dari gambar 4.17 menunjukkan bahwa tegangan pada masing-masing bus mengalami penurunan saat detik ke-2. Bus 1AL-B mengalami penurunan tegangan hingga 87,63% dan kembali stabil pada 95,72%. Bus 3HT mengalami penurunan tegangan hingga 92,81% dan kembali stabil pada 100,00%. Bus W2 mengalami penurunan tegangan hingga 92,29% dan kembali stabil pada 99,48%. Penurunan tegangan yang terjadi karena beban-beban pada sistem tidak tersuplai secara penuh.



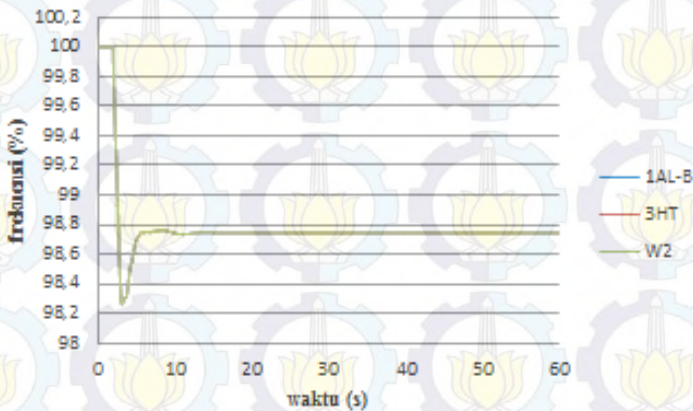
Gambar 4.18 Respon Sudut Rotor Generator STG 2-1 dan STG 2-2 *Outage* dari Sistem dengan Mekanisme *Load Shedding* Tahap 1

Gambar 4.18 menunjukkan respon sudut rotor relatif terhadap swing generator dari masing-masing generator pada saat STG 2-1 dan STG 2-2 *outage*. Dari gambar tersebut, terlihat masing-masing generator mengalami osilasi dengan titik terendah saat antara detik ke-5 sampai ke-6. Generator STG 1-5A mengalami perubahan sudut rotor hingga $-15,04^0$ dan kembali stabil pada $-5,74^0$. Generator STG 1-6 mengalami perubahan sudut rotor hingga $-16,5^0$ dan kembali stabil pada $-9,51^0$. Generator STG 2-3 mengalami perubahan sudut rotor hingga $-10,77^0$ dan kembali stabil pada $-7,66^0$. Generator STG NEW 1 relatif stabil dan tidak mengalami perubahan. Generator STG NEW 2 relatif stabil dan tidak mengalami perubahan.

Berdasarkan data simulasi respon frekuensi, tegangan dan sudut rotor diatas dapat disimpulkan bahwa sistem masih dapat mempertahankan kestabilannya ketika terjadi kasus generator STG 2-1 dan STG 2-2 *outage*. Terjadi Osilasi dari masing-masing respon akan tetapi menurut standar IEEE Std C37.106-2003, penurunan ataupun kenaikan yang terjadi masih diperkenankan.

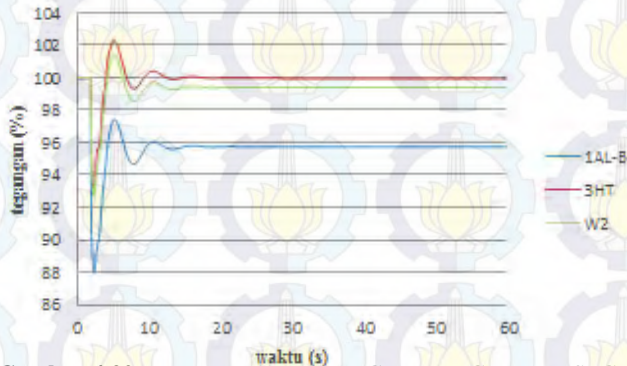
4.3.1.7 Studi Kasus STG 1-6 + STG 2-1 OFF: Generator STG 1-6 dan Generator STG 2-1 Outage dari Sistem ($t=2s$)

Pada studi kasus ini akan ditampilkan hasil dari simulasi dan analisis kestabilan transien saat generator STG 1-6 dan STG 2-1 *OFF* di sisi *Power plant 1 & 2* dan 6 generator lainnya *ON* pada sistem kelistrikan PT. Pertamina RU V Balikpapan. Generator disimulasikan *outage* saat 2 detik setelah sistem bekerja dengan total waktu simulasi selama 60 detik.



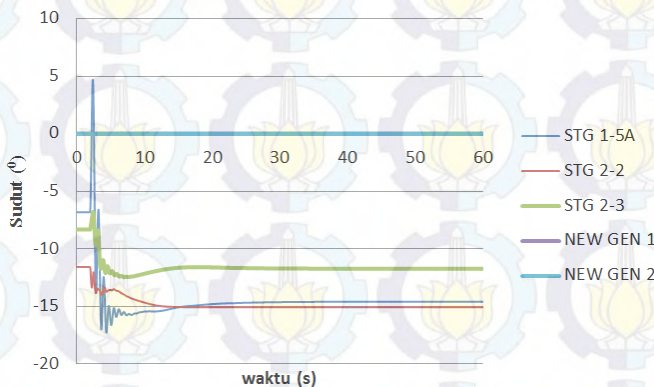
Gambar 4.19 Respon Frekuensi Saat Generator STG 1-6 dan STG 2-1 *Outage* dari Sistem

Pada Gambar 4.19 menunjukkan bahwa frekuensi bus pada masing-masing level tegangan mengalami penurunan, akan tetapi sistem masih dapat mempertahankan kestabilannya. Penurunan frekuensi terendah mencapai 98,26% pada detik ke 3,17 s. Penurunan frekuensi terjadi karena suplai daya yang hilang dari generator STG 1-6 dan STG 2-1 dengan total sebesar 13 MW. Sistem kembali *steady state* pada 99,74% dari frekuensi normal. Berdasarkan kepada standar ANSI/IEEE C37.106-1987 penurunan frekuensi yang terjadi pada studi kasus ini tidak diperkenankan, sehingga dibutuhkan mekanisme *Load shedding* tahap 1.



Gambar 4.20 Respon Tegangan saat Generator Generator STG 1-6 dan STG 2-1 *Outage* dari Sistem

Dari gambar 4.20 menunjukkan bahwa tegangan pada masing-masing bus mengalami penurunan saat detik ke-2. Bus 1AL-B mengalami penurunan tegangan hingga 89,02% dan kembali stabil pada 95,74%. Bus 3HT mengalami penurunan tegangan hingga 92,86% dan kembali stabil pada 99,95%. Bus W2 mengalami penurunan tegangan hingga 92,69% dan kembali stabil pada 99,39%. Penurunan tegangan yang terjadi karena beban-beban pada sistem tidak tersuplai secara penuh.



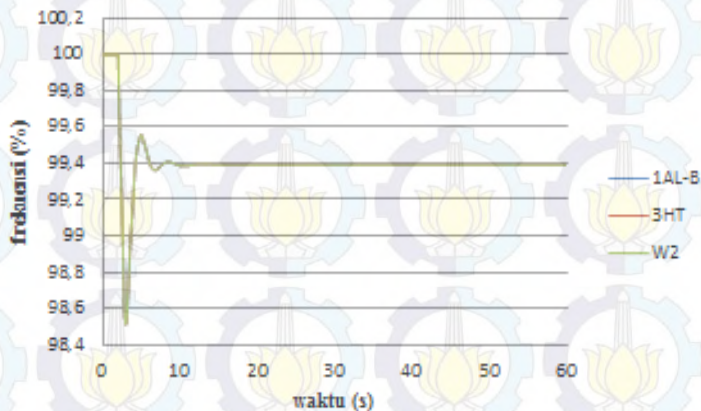
Gambar 4.21 Respon Sudut Rotor STG 1-6 dan STG 2-1 *Outage* dari Sistem

Gambar 4.21 menunjukkan respon sudut rotor relatif terhadap swing generator dari masing-masing generator pada saat STG 1-6 dan STG 2-1 *outage*. Dari gambar tersebut, terlihat masing-masing generator mengalami osilasi dengan titik terendah saat antara detik ke-2 sampai ke-4. Generator STG 1-5A mengalami perubahan sudut rotor hingga $-13,84^0$ dan kembali stabil pada $-5,74^0$. Generator STG 2-2 mengalami perubahan sudut rotor hingga $-13,84^0$ dan kembali stabil pada $-15,07^0$. Generator STG 2-3 mengalami perubahan sudut rotor hingga mencapai titik kestabilannya pada $-11,73^0$. Generator STG NEW 1 relatif stabil dan tidak mengalami perubahan. Generator STG NEW 2 relatif stabil dan tidak mengalami perubahan.

Berdasarkan data simulasi respon tegangan dan sudut rotor diatas dapat disimpulkan bahwa sistem masih dapat mempertahankan kestabilannya, akan tetapi respon frekuensi menunjukan bahwa sistem mengalami penurunan yang masih tidak diperkenankan berdasarkan dari standar ANSI/IEEE C37.106-1987. Sehingga dibutuhkan mekanisme *Load shedding* tahap 1.

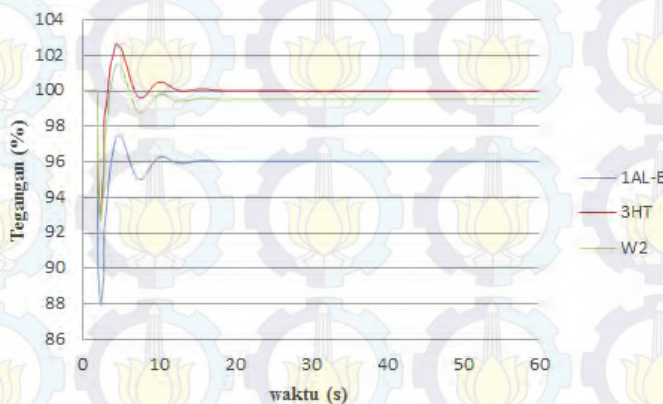
4.3.1.8 Studi Kasus STG 1-6 + 2-1 OFF + LS1: Generator STG 1-6 dan Generator 2-1 Outage dari Sistem ($t=2s$) dengan Load Shedding 1

Pada studi kasus ini akan ditampilkan hasil dari simulasi dan analisis kestabilan transien saat generator STG 1-6 dan STG 2-1 *OFF* di sisi *Power plant 1 & 2* dan 6 generator lainnya *ON* diikuti dengan mekanisme pelepasan *load shedding* tahap 1 pada sistem kelistrikan PT. Pertamina RU V Balikpapan. Generator disimulasikan *outage* saat 2 detik setelah sistem bekerja dengan total waktu simulasi selama 60 detik. *Load shedding* tahap 1 dilakukan pada saat 2,82 s (2,7 s waktu pada saat sistem mengalami penurunan frekuensi minimal sesuai standar pelepasan beban 3 langkah + 0,12 s delay waktu). Standar *load shedding* yang digunakan pada tugas akhir ini adalah *load shedding* tiga langkah berdasar standar ANSI/IEEE C37.106-1987.



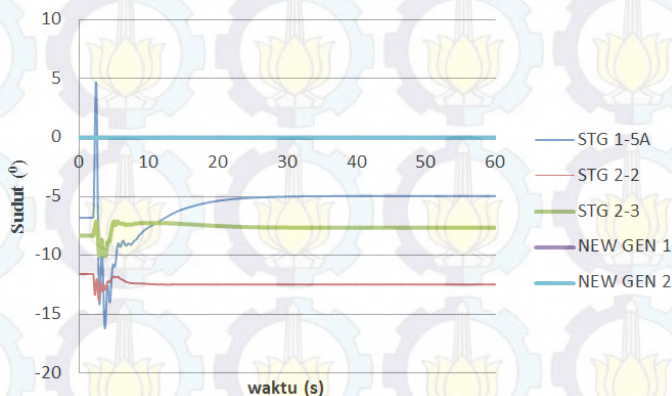
Gambar 4.22 Respon Frekuensi Saat Generator STG 1-6 dan STG 2-1 *Outage* dari Sistem dengan Mekanisme *Load Shedding* Tahap 1

Pada Gambar 4.22 menunjukkan bahwa frekuensi bus pada masing-masing level tegangan mengalami penurunan, akan tetapi sistem masih dapat mempertahankan kestabilannya. Penurunan frekuensi terendah mencapai 98,50% pada detik ke 3,00 s. Penurunan frekuensi terjadi karena suplai daya yang hilang dari generator STG 1-6 dan STG 2-1 dengan total sebesar 13 MW. Sistem kembali *steady state* pada 99,69% dari frekuensi normal. Berdasarkan kepada standar ANSI/IEEE C37.106-1987 penurunan frekuensi yang terjadi pada studi kasus ini masih diperkenankan.



Gambar 4.23 Respon Tegangan saat Generator STG 1-5A dan STG 1-6 *Outage* dari Sistem dengan Mekanisme *Load Shedding* Tahap 1

Dari gambar 4.23 menunjukkan bahwa tegangan pada masing-masing bus mengalami penurunan saat detik ke-2. Bus 1AL-B mengalami penurunan tegangan hingga 87,95% dan kembali stabil pada 96,03%. Bus 3HT mengalami penurunan tegangan hingga 92,88% dan kembali stabil pada 100,00%. Bus W2 mengalami penurunan tegangan hingga 92,69% dan kembali stabil pada 99,52%. Penurunan tegangan yang terjadi karena beban-beban pada sistem tidak tersuplai secara penuh.



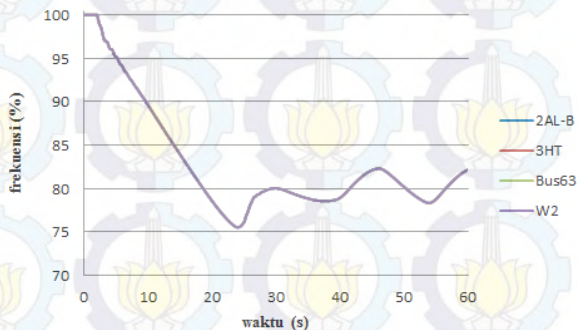
Gambar 4.24 Respon Sudut Rotor STG 1-6 dan STG 2-1 *Outage* dari Sistem dengan Mekanisme *Load Shedding* Tahap 1

Gambar 4.24 menunjukkan respon sudut rotor relatif terhadap swing generator dari masing-masing generator pada saat STG 1-6 dan STG 2-1 *outage* dengan Mekanisme *Load Shedding*. Dari gambar tersebut, terlihat masing-masing generator mengalami osilasi dengan titik terendah saat antara detik ke-2 sampai ke-4. Generator STG 1-5A mengalami perubahan sudut rotor hingga $-13,84^{\circ}$ dan kembali stabil pada $-5,74^{\circ}$. Generator STG 2-2 mengalami perubahan sudut rotor hingga $-13,84^{\circ}$ dan kembali stabil pada $-15,07^{\circ}$. Generator STG 2-3 mengalami perubahan sudut rotor hingga mencapai titik kestabilannya pada $-11,73^{\circ}$. Generator STG NEW 1 relatif stabil dan tidak mengalami perubahan. Generator STG NEW 2 relatif stabil dan tidak mengalami perubahan.

Berdasarkan data simulasi respon frekuensi, tegangan dan sudut rotor diatas dapat disimpulkan bahwa sistem masih dapat mempertahankan kestabilannya ketika terjadi kasus generator STG 1-6 dan STG 2-1 *outage*. Terjadi Osilasi dari masing-masing respon tetapi menurut standar IEEE Std C37.106-2003, penurunan ataupun kenaikan yang terjadi masih diperkenankan.

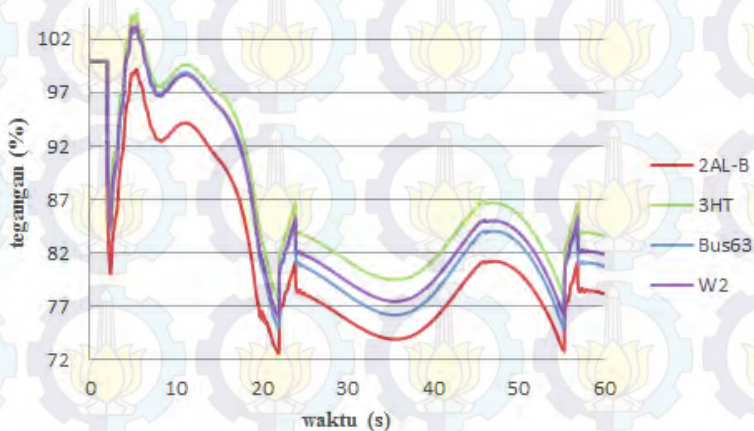
4.3.1.9 Studi Kasus New 1 + 1-5A OFF : Generator STG New 1 dan Generator 1-5 Outage dari Sistem ($t=2s$)

Pada studi kasus ini akan ditampilkan hasil dari simulasi dan analisis kestabilan transien saat generator STG New 1 dan STG 1-5A OFF di sisi *power plant 1 & 3* dan 6 generator lainnya ON pada sistem kelistrikan PT. Pertamina RU V Balikpapan. Generator disimulasikan *outage* saat 2 detik setelah sistem bekerja dengan total waktu simulasi selama 60 detik.



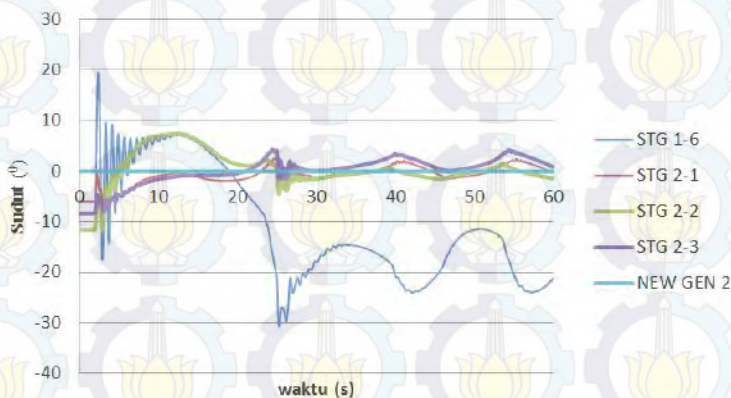
Gambar 4.25 Respon Frekuensi Saat Generator STG New 1 dan STG 1-5A Outage dari Sistem

Pada Gambar 4.25 menunjukkan bahwa frekuensi bus pada masing-masing level tegangan mengalami penurunan, akan tetapi sistem masih dapat mempertahankan kestabilannya. Penurunan frekuensi terendah mencapai 75,55% pada detik ke 23,98 s. Penurunan frekuensi terjadi karena suplai daya yang hilang dari generator STG new 1 dan STG 1-5A dengan total sebesar 20 MW. Sistem kembali *steady state* pada 82,20% dari frekuensi normal. Berdasarkan kepada standar ANSI/IEEE C37.106-1987 penurunan frekuensi yang terjadi pada studi kasus ini tidak diperkenankan, sehingga dibutuhkan mekanisme *Load shedding* tahap 1.



Gambar 4.26 Respon Tegangan Saat Generator STG New 1 dan STG 1-5A Outage dari Sistem

Dari gambar 4.26 menunjukkan bahwa tegangan pada masing-masing bus mengalami penurunan saat detik ke-16. Bus 1AL-B mengalami penurunan tegangan hingga 72,66% dan kembali stabil pada 78,25%. Bus 3HT mengalami penurunan tegangan hingga 77,98% dan kembali stabil pada 83,63%. Bus 63 mengalami penurunan tegangan hingga 75,01% dan kembali stabil pada 80,82%. Bus W2 mengalami penurunan tegangan hingga 76,12% dan kembali stabil pada 81,92%. Penurunan tegangan yang terjadi karena beban-beban pada sistem tidak tersuplai secara penuh.



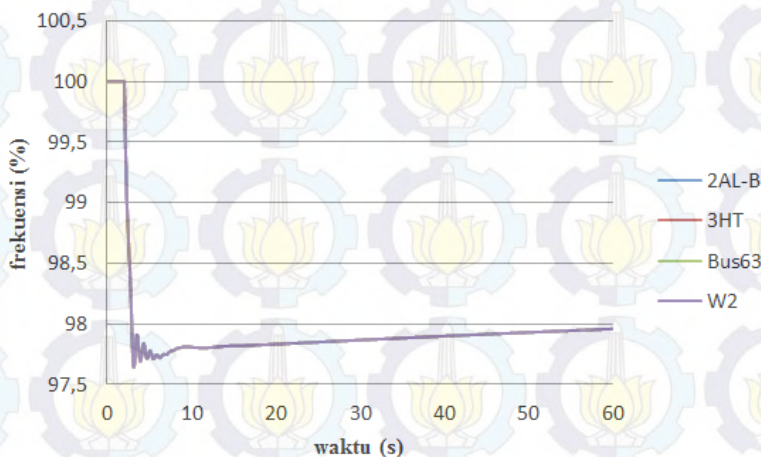
Gambar 4.27 Respon Sudut Rotor Saat Generator STG new 1 dan STG 1-5A Outage dari Sistem

Gambar 4.27 menunjukkan respon sudut rotor relatif terhadap swing generator dari masing-masing generator pada saat STG New 1 dan STG 1-5A outage. Dari gambar tersebut, terlihat masing-masing generator mengalami osilasi dengan titik terendah yang bervariasi. Generator STG 1-6 mengalami perubahan sudut rotor hingga 17° , kemudian kembali stabil dan berosilasi pada sudut rotor $-21,2^{\circ}$ sampai $-23,3^{\circ}$. Generator STG 2-1 mengalami perubahan sudut rotor hingga 13° dan kembali stabil pada $-0,3^{\circ}$. Generator STG 2-2 mengalami perubahan sudut rotor hingga 11° dan kembali stabil pada $-1,4^{\circ}$. Generator STG 2-3 mengalami perubahan sudut rotor hingga 12° dan kembali stabil pada $-0,85^{\circ}$. Generator STG New 2 relatif stabil dan tidak mengalami perubahan.

Berdasarkan data simulasi respon tegangan dan sudut rotor diatas dapat disimpulkan bahwa sistem masih dapat mempertahankan kestabilannya, akan tetapi respon frekuensi menunjukan bahwa sistem mengalami penurunan yang masih tidak diperkenankan berdasarkan dari standar ANSI/IEEE C37.106-1987. Sehingga dibutuhkan mekanisme *Load shedding* tahap 1.

4.3.1.10 Studi Kasus New 1 + 1-5A OFF + LSI: Generator STG New 1 dan Generator 1-5A Outage dari Sistem ($t=2s$) dengan Load Shedding 1

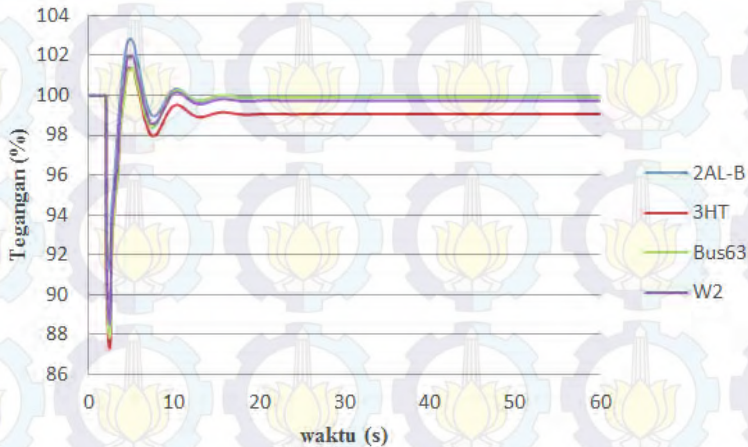
Pada studi kasus ini akan ditampilkan hasil dari simulasi dan analisis kestabilan transien saat generator STG New 1 dan STG 1-5A OFF di sisi *power plant 1 & 3* dan 6 generator lainnya ON diikuti dengan mekanisme pelepasan *load shedding* tahap 1 pada sistem kelistrikan PT. Pertamina RU V Balikpapan. Generator disimulasikan *outage* saat 2 detik setelah sistem bekerja dengan total waktu simulasi selama 60 detik. *Load shedding* tahap 1 dilakukan pada saat 2,58 s (2,46 s waktu pada saat sistem mengalami penurunan frekuensi minimal sesuai standar pelepasan beban 3 langkah + 0,12 s delay waktu). Standar *load shedding* yang digunakan pada tugas akhir ini adalah *load shedding* tiga langkah berdasar standar ANSI/IEEE C37.106-1987.



Gambar 4.28 Respon Frekuensi Saat Generator STG New 1 dan STG 1-5A Outage dari Sistem dengan Mekanisme Load Shedding Tahap 1

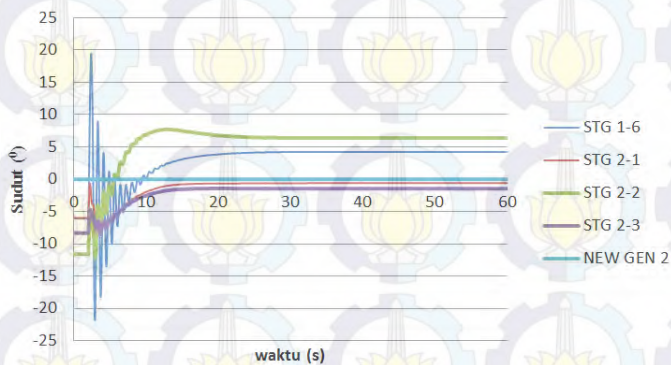
Pada Gambar 4.28 menunjukkan bahwa frekuensi bus pada masing-masing level tegangan mengalami penurunan, akan tetapi sistem masih dapat mempertahankan kestabilannya. Penurunan frekuensi terendah mencapai 97,64% pada detik ke 3,16 s. Penurunan frekuensi terjadi karena suplai daya yang hilang dari generator STG New 1 dan STG 1-5A dengan total sebesar 20 MW. Sistem kembali *steady state* pada

97,96% dari frekuensi normal. Berdasarkan kepada standar ANSI/IEEE C37.106-1987 penurunan frekuensi yang terjadi pada studi kasus ini tidak diperkenankan, sehingga dibutuhkan mekanisme *Load shedding* tahap 2.



Gambar 4.29 Respon Tegangan Saat Generator STG New 1 dan STG 1-5A Outage dari Sistem dengan Mekanisme *Load Shedding* Tahap 1

Dari gambar 4.29 menunjukkan bahwa tegangan pada masing-masing bus mengalami penurunan saat detik ke-2. Bus 2AL-B mengalami penurunan tegangan hingga 91,28% dan kembali stabil pada 99,94%. Bus 3HT mengalami penurunan tegangan hingga 87,30% dan kembali stabil pada 99,06%. Bus 63 mengalami penurunan tegangan hingga 87,82% dan kembali stabil pada 99,90%. Bus W2 mengalami penurunan tegangan hingga 88,53% dan kembali stabil pada 99,73%. Penurunan tegangan yang terjadi karena beban-beban pada sistem tidak tersuplai secara penuh.



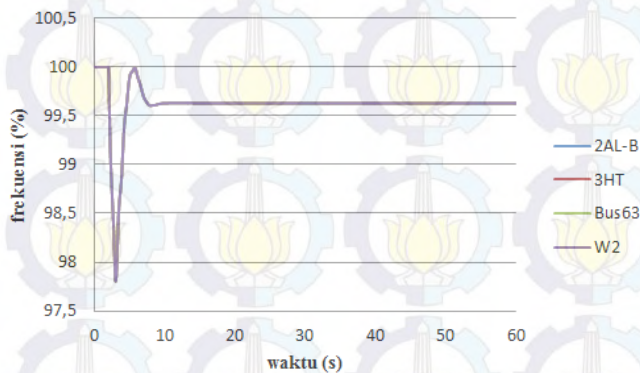
Gambar 4.30 Respon Tegangan Saat Generator STG New 1 dan STG 1-5A Outage dari Sistem dengan Mekanisme Load Shedding Tahap 1

Gambar 4.30 menunjukkan respon sudut rotor relatif terhadap swing generator dari masing-masing generator pada saat STG New 1 dan STG 1-5A outage setelah dilakukan load shedding tahap 1. Dari gambar tersebut, terlihat masing-masing generator mengalami osilasi dengan titik terendah yang bervariasi. Generator STG 1-6 mengalami perubahan sudut rotor hingga 1° , kemudian kembali stabil pada sudut $-0,6^{\circ}$. Generator STG 2-1 mengalami perubahan sudut rotor hingga 4° dan kembali stabil pada $-6,4^{\circ}$. Generator STG 2-2 mengalami perubahan sudut rotor hingga 11° dan kembali stabil pada $0,87^{\circ}$. Generator STG 2-3 mengalami perubahan sudut rotor hingga 7° dan kembali stabil pada $-1,45^{\circ}$. Generator STG New 2 relatif stabil dan tidak mengalami perubahan.

Berdasarkan data simulasi respon tegangan dan sudut rotor diatas dapat disimpulkan bahwa sistem masih dapat mempertahankan kestabilannya, akan tetapi respon frekuensi menunjukkan bahwa sistem mengalami penurunan yang masih tidak diperkenankan berdasarkan dari standar ANSI/IEEE C37.106-1987. Sehingga dibutuhkan mekanisme Load shedding tahap 2.

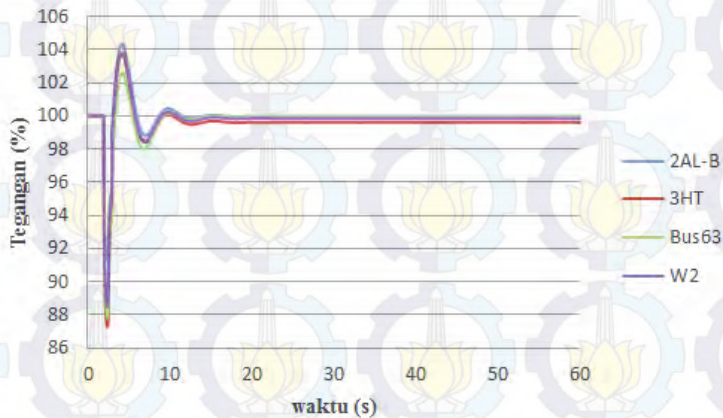
4.3.1.11 Studi Kasus New 1 + 1-5A OFF + LS2: Generator STG New 1 dan Generator 1-5 Outage dari Sistem (t=2s) dengan Load Shedding 2

Pada studi kasus ini akan ditampilkan hasil dari simulasi dan analisis kestabilan transien saat generator STG New 1 dan STG 1-5A OFF di sisi *power plant 1 & 3* dan 6 generator lainnya ON diikuti dengan mekanisme pelepasan *load shedding* tahap 2 pada sistem kelistrikan PT. Pertamina RU V Balikpapan. Generator disimulasikan *outage* saat 2 detik setelah sistem bekerja dengan total waktu simulasi selama 60 detik. *Load shedding* tahap 2 dilakukan pada saat 2,98 s (2,86 s waktu pada saat sistem mengalami penurunan frekuensi minimal sesuai standar pelepasan beban 3 langkah + 0,12 s delay waktu). Standar *load shedding* yang digunakan pada tugas akhir ini adalah *load shedding* tiga langkah berdasar standar ANSI/IEEE C37.106-1987.



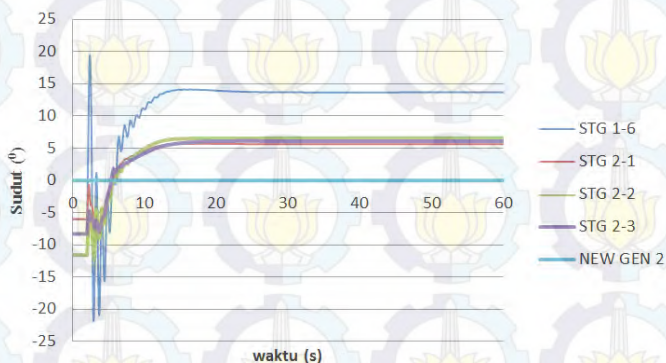
Gambar 4.31 Respon Frekuensi Saat Generator STG New 1 dan STG 1-5A Outage dari Sistem dengan Mekanisme Load Shedding Tahap 2

Pada Gambar 4.31 menunjukkan bahwa frekuensi bus pada masing-masing level tegangan mengalami penurunan, akan tetapi sistem masih dapat mempertahankan kestabilannya. Penurunan frekuensi terendah mencapai 97,80% pada detik ke 3,02 s. Penurunan frekuensi terjadi karena suplai daya yang hilang dari generator STG New 1 dan STG 1-5A dengan total sebesar 20 MW. Sistem kembali *steady state* pada 99,63% dari frekuensi normal. Berdasarkan kepada standar ANSI/IEEE C37.106-1987 penurunan frekuensi yang terjadi pada studi kasus ini masih diperkenankan.



Gambar 4.32 Respon Tegangan Saat Generator STG New 1 dan STG 1-5A Outage dari Sistem dengan Mekanisme *Load Shedding* Tahap 2

Dari gambar 4.32 menunjukkan bahwa tegangan pada masing-masing bus mengalami penurunan saat detik ke-2. Bus 1AL-B mengalami penurunan tegangan hingga 91,28% dan kembali stabil pada 99,98%. Bus 3HT mengalami penurunan tegangan hingga 87,30% dan kembali stabil pada 99,61%. Bus 63 mengalami penurunan tegangan hingga 87,82% dan kembali stabil pada 99,92%. Bus W2 mengalami penurunan tegangan hingga 88,53% dan kembali stabil pada 99,85%. Penurunan tegangan yang terjadi karena beban-beban pada sistem tidak tersuplai secara penuh.



Gambar 4.33 Respon Tegangan Saat Generator STG New 1 dan STG 1-5A *Outage* dari Sistem dengan Mekanisme *Load Shedding* Tahap 2

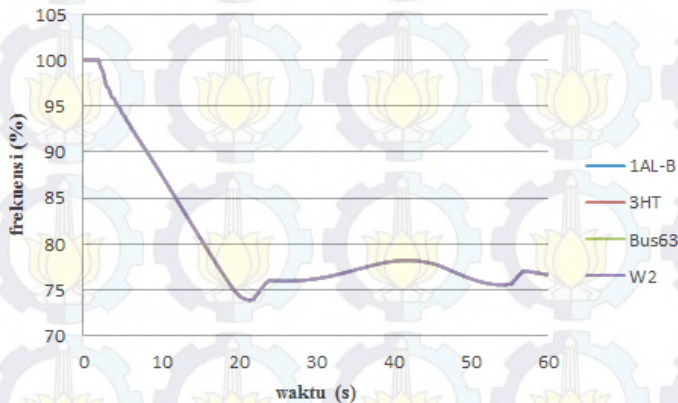
Gambar 4.33 menunjukkan respon sudut rotor relatif terhadap swing generator dari masing-masing generator pada saat STG New 1 dan STG 1-5A *outage* setelah dilakukan *load shedding* tahap 2. Dari gambar tersebut, terlihat masing-masing generator mengalami osilasi dengan titik terendah yang bervariasi. Generator STG 1-6 mengalami perubahan sudut rotor hingga 26° , kemudian kembali stabil pada sudut $13,6^{\circ}$. Generator STG 2-1 mengalami perubahan sudut rotor hingga 12° dan kembali stabil pada $5,62^{\circ}$. Generator STG 2-2 mengalami perubahan sudut rotor hingga 19° dan kembali stabil pada $6,58^{\circ}$. Generator STG 2-3 mengalami perubahan sudut rotor hingga 14° dan kembali stabil pada $6,1^{\circ}$. Generator STG New 2 relatif stabil dan tidak mengalami perubahan.

Berdasarkan data simulasi respon frekuensi, tegangan dan sudut rotor diatas dapat disimpulkan bahwa sistem masih dapat mempertahankan kestabilannya ketika terjadi kasus generator STG 1-5A dan STG New 1 dan STG 1-5A *outage*. Terjadi Osilasi dari masing-masing respon tetapi menurut standar IEEE Std C37.106-2003, penurunan ataupun kenaikan yang terjadi masih diperkenankan.

4.3.1.12 Studi Kasus Generator STG New 2 + 2-1 OFF: Generator Generator STG New 2 dan Generator 2-1 *Outage* dari Sistem ($t=2s$)

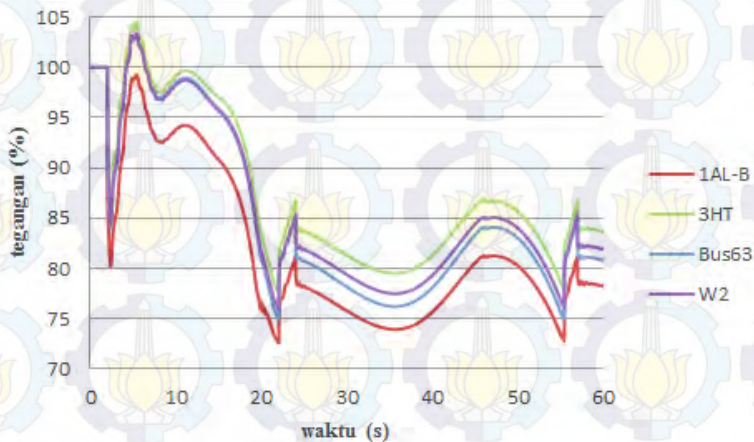
Pada studi kasus ini akan ditampilkan hasil dari simulasi dan analisis kestabilan transien saat generator generator STG New 2 dan STG 2-1 OFF di sisi *power plant* 2 & 3 dan 6 generator lainnya ON

pada sistem kelistrikan PT. Pertamina RU V Balikpapan. Generator disimulasikan *outage* saat 2 detik setelah sistem bekerja dengan total waktu simulasi selama 60 detik.



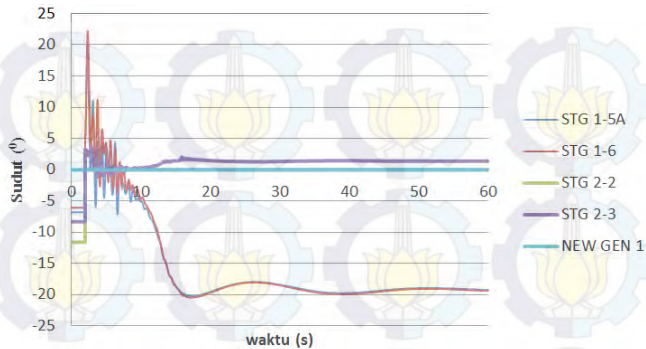
Gambar 4.34 Respon Frekuensi Saat Generator STG New 2 dan STG 2-1 *Outage* dari Sistem

Pada Gambar 4.34 menunjukkan bahwa frekuensi bus pada masing-masing level tegangan mengalami penurunan, akan tetapi sistem masih dapat mempertahankan kestabilannya. Penurunan frekuensi terendah mencapai 73,90% pada detik ke 21,48 s. Penurunan frekuensi terjadi karena suplai daya yang hilang dari generator generator STG New 2 dan STG 2-1 dengan total sebesar 23 MW. Sistem kembali *steady state* pada 76,67% dari frekuensi normal. Berdasarkan kepada standar ANSI/IEEE C37.106-1987 penurunan frekuensi yang terjadi pada studi kasus ini tidak diperkenankan, sehingga dibutuhkan mekanisme *Load shedding* tahap 1.



Gambar 4.35 Respon Tegangan Saat Generator STG New 2 dan STG 2-1 *Outage* dari Sistem

Dari gambar 4.35 menunjukkan bahwa tegangan pada masing-masing bus mengalami penurunan saat detik ke-22. Bus 1AL-B mengalami penurunan tegangan hingga 72,66% dan kembali stabil pada 78,25%. Bus 3HT mengalami penurunan tegangan hingga 77,99% dan kembali stabil pada 83,63%. Bus 63 mengalami penurunan tegangan hingga 75,01% dan kembali stabil pada 80,82%. Bus W2 mengalami penurunan tegangan hingga 76,12% dan kembali stabil pada 81,92%. Penurunan tegangan yang terjadi karena beban-beban pada sistem tidak tersuplai secara penuh.



Gambar 4.36 Respon Tegangan Saat Generator Generator STG New 2 dan STG 2-1 *Outage* dari Sistem

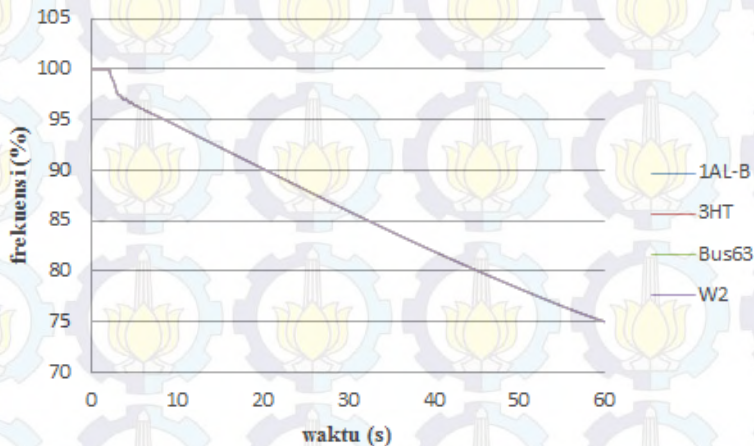
Gambar 4.36 menunjukkan respon sudut rotor relatif terhadap swing generator dari masing-masing generator pada saat STG New 2 dan STG 2-1 *outage*. Dari gambar tersebut, terlihat masing-masing generator mengalami osilasi dengan titik terendah yang bervariasi. Generator STG 1-5A mengalami perubahan sudut rotor hingga 25° , kemudian kembali stabil pada sudut $-19,23^{\circ}$. Generator STG 1-6 mengalami perubahan sudut rotor hingga 27° dan kembali stabil pada $-19,38^{\circ}$. Generator STG 2-2 mengalami perubahan sudut rotor hingga 12° dan kembali stabil pada 0° . Generator STG 2-3 mengalami perubahan sudut rotor hingga 12° dan kembali stabil pada $1,4^{\circ}$. Generator STG New 1 relatif stabil dan tidak mengalami perubahan.

Berdasarkan data simulasi respon tegangan dan sudut rotor diatas dapat disimpulkan bahwa sistem masih dapat mempertahankan kestabilannya, akan tetapi respon frekuensi menunjukan bahwa sistem mengalami penurunan yang masih tidak diperkenankan berdasarkan dari standar ANSI/IEEE C37.106-1987. Sehingga dibutuhkan mekanisme *Load shedding* tahap 1.

4.3.1.13 Studi Kasus Generator STG New 2 + 2-1 OFF+ LSI: Generator Generator STG New 2 dan Generator 2-1 *Outage* dari Sistem ($t=2s$) dengan *Load Shedding 1*

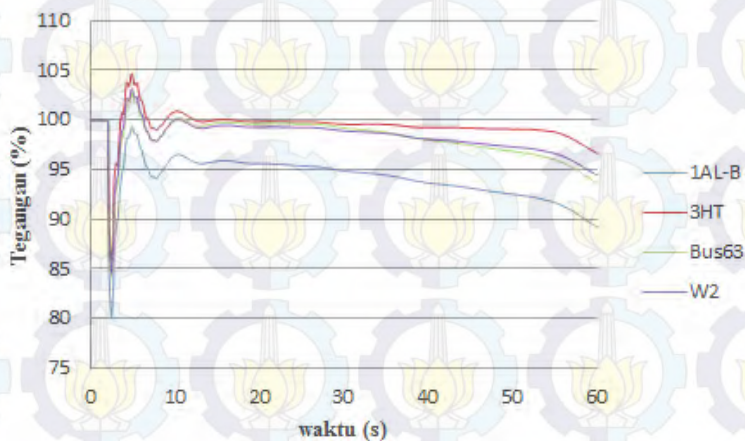
Pada studi kasus ini akan ditampilkan hasil dari simulasi dan analisis kestabilan transien saat generator generator STG New 2 dan STG 2-1 OFF di sisi *power plant 2 & 3* dan 6 generator lainnya ON diikuti dengan mekanisme pelepasan *load shedding* tahap 1 pada sistem kelistrikan PT. Pertamina RU V Balikpapan. Generator disimulasikan

outage saat 2 detik setelah sistem bekerja dengan total waktu simulasi selama 60 detik. *Load shedding* tahap 1 dilakukan pada saat 2,64 s (2,52 s waktu pada saat sistem mengalami penurunan frekuensi minimal sesuai standar pelepasan beban 3 langkah + 0,12 s delay waktu) Standar *load shedding* yang digunakan pada tugas akhir ini adalah *load shedding* tiga langkah berdasar standar ANSI/IEEE C37.106-1987.



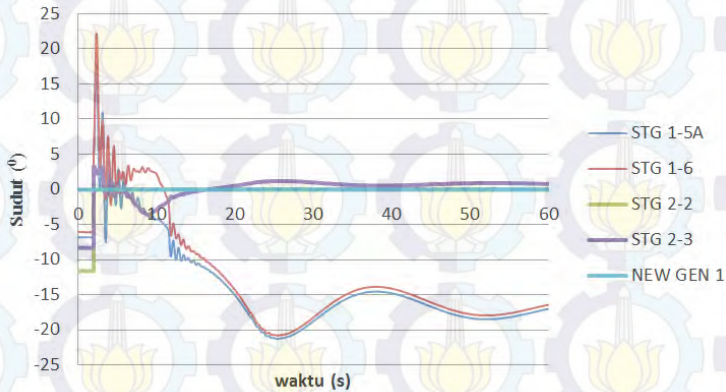
Gambar 4.37 Respon Frekuensi Saat Generator Generator STG New 2 dan STG 2-1 *Outage* dari Sistem dengan Mekanisme *Load Shedding* Tahap 1

Pada Gambar 4.37 menunjukkan bahwa frekuensi bus pada masing-masing level tegangan mengalami penurunan terus-menerus dan sistem tidak dapat mempertahankan kestabilannya. Penurunan frekuensi terjadi karena suplai daya yang hilang dari generator generator STG New 2 dan STG 2-1 dengan total sebesar 23 MW. Pada akhir waktu simulasi yaitu 60s frekuensi masih terus turun, sehingga ketika sistem mengalami gangguan seperti studi kasus ini tidak akan didapatkan kondisi *steady state*. Berdasarkan kepada standar ANSI/IEEE C37.106-1987 penurunan frekuensi yang terjadi pada studi kasus ini tidak diperkenankan, sehingga dibutuhkan mekanisme *Load shedding* tahap 1.



Gambar 4.38 Respon Tegangan Saat Generator Generator STG New 2 dan STG 2-1 *Outage* dari Sistem dengan Mekanisme *Load Shedding* Tahap 1

Dari gambar 4.38 menunjukkan bahwa tegangan pada masing-masing bus mengalami penurunan saat detik ke-2. Bus 1AL-B mengalami penurunan tegangan hingga 80,15% dan kembali stabil pada 89,14%. Bus 3HT mengalami penurunan tegangan hingga 85,08% dan kembali stabil pada 96,57%. Bus 63 mengalami penurunan tegangan hingga 84,12% dan kembali stabil pada 93,59%. Bus W2 mengalami penurunan tegangan hingga 84,53% dan kembali stabil pada 94,37%. Penurunan tegangan yang terjadi karena beban-beban pada sistem tidak tersuplai secara penuh.



Gambar 4.39 Respon Sudut Rotor Saat Generator Generator STG New 2 dan STG 2-1 *Outage* dari Sistem dengan Mekanisme *Load Shedding* Tahap 1

Gambar 4.39 menunjukkan respon sudut rotor relatif terhadap swing generator dari masing-masing generator pada saat STG New 2 dan STG 2-1 *outage* setelah dilakukan dengan Mekanisme *Load Shedding* Tahap 1. Dari gambar tersebut, terlihat masing-masing generator mengalami osilasi dengan titik terendah yang bervariasi. Generator STG 1-5A mengalami perubahan sudut rotor hingga 15° , kemudian kembali stabil pada sudut $-17,02^{\circ}$. Generator STG 1-6 mengalami perubahan sudut rotor hingga 28° dan kembali stabil pada $-16,41^{\circ}$. Generator STG 2-2 mengalami perubahan sudut rotor hingga 12° dan kembali stabil pada 0° . Generator STG 2-3 mengalami perubahan sudut rotor hingga 12° dan kembali stabil pada $0,78^{\circ}$. Generator STG New 1 relatif stabil dan tidak mengalami perubahan.

Berdasarkan data simulasi respon tegangan dan sudut rotor diatas dapat disimpulkan bahwa sistem masih dapat mempertahankan kestabilannya, akan tetapi respon frekuensi menunjukkan bahwa sistem mengalami penurunan yang masih tidak diperkenankan berdasarkan dari standar ANSI/IEEE C37.106-1987. Sehingga dibutuhkan mekanisme *Load shedding* tahap 2.

4.3.1.14 Studi Kasus Generator STG New 2 + STG 2-1 OFF + LS2: Generator Generator STG New 2 dan Generator 2-1 Outage dari Sistem (t=2s) dengan Load Shedding 2

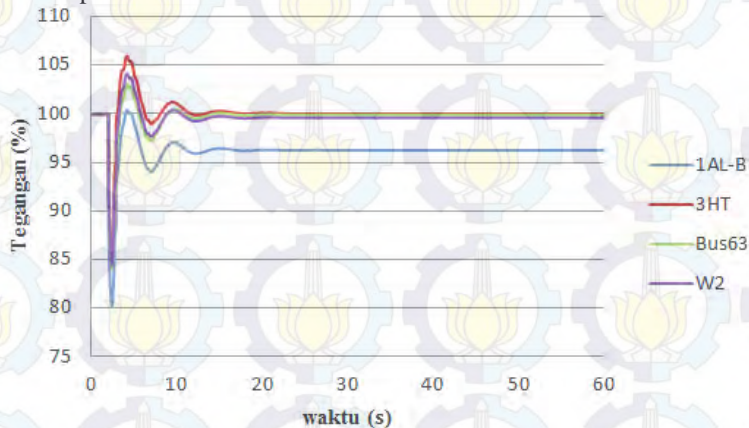
Pada studi kasus ini akan ditampilkan hasil dari simulasi dan analisis kestabilan transien saat generator generator STG New 2 dan STG 2-1 OFF di sisi *power plant* 2 & 3 dan 6 generator lainnya ON diikuti dengan mekanisme pelepasan *load shedding* tahap 2 pada sistem kelistrikan PT. Pertamina RU V Balikpapan. Generator disimulasikan *outage* saat 2 detik setelah sistem bekerja dengan total waktu simulasi selama 60 detik. *Load shedding* tahap 2 dilakukan pada saat 2,86 s (2,74 s waktu pada saat sistem mengalami penurunan frekuensi minimal sesuai standar pelepasan beban 3 langkah + 0,12 s delay waktu) Standar *load shedding* yang digunakan pada tugas akhir ini adalah *load shedding* tiga langkah berdasar standar ANSI/IEEE C37.106-1987.



Gambar 4.40 Respon Frekuensi Saat Generator Generator STG New 2 dan STG 2-1 Outage dari Sistem dengan Mekanisme *Load Shedding* Tahap 2

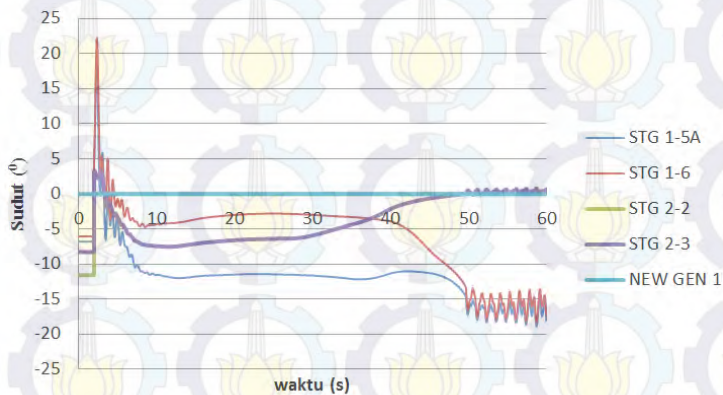
Pada Gambar 4.40 menunjukkan bahwa frekuensi bus pada masing-masing level tegangan mengalami penurunan, akan tetapi sistem masih dapat mempertahankan kestabilannya. Penurunan frekuensi terendah mencapai 97,65% pada detik ke 3,02 s. Penurunan frekuensi terjadi karena suplai daya yang hilang dari generator generator STG New 2 dan STG 2-1 dengan total sebesar 23 MW. Sistem kembali *steady state* pada 99,22% dari frekuensi normal. Berdasarkan kepada standar ANSI/IEEE

C37.106-1987 penurunan frekuensi yang terjadi pada studi kasus ini masih diperkenankan.



Gambar 4.41 Respon Tegangan Saat Generator STG New 2 dan STG 2-1 Outage dari Sistem dengan Mekanisme *Load Shedding* Tahap 2

Dari gambar 4.41 menunjukkan bahwa tegangan pada masing-masing bus mengalami penurunan saat detik ke-2. Bus 1AL-B mengalami penurunan tegangan hingga 80,15% dan kembali stabil pada 96,26%. Bus 3HT mengalami penurunan tegangan hingga 85,08% dan kembali stabil pada 100,00%. Bus 63 mengalami penurunan tegangan hingga 84,12% dan kembali stabil pada 99,91%. Bus W2 mengalami penurunan tegangan hingga 84,53% dan kembali stabil pada 99,60%. Penurunan tegangan yang terjadi karena beban-beban pada sistem tidak tersuplai secara penuh.



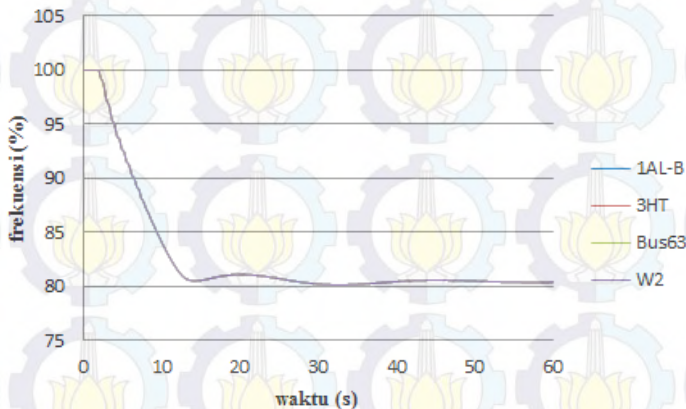
Gambar 4.42 Respon Sudut Rotor Saat Generator Generator STG New 2 dan STG 2-1 *Outage* dari Sistem dengan Mekanisme *Load Shedding* Tahap 2

Gambar 4.42 menunjukkan respon sudut rotor relatif terhadap swing generator dari masing-masing generator pada saat STG New 2 dan STG 2-1 *outage* setelah dilakukan dengan Mekanisme *Load Shedding* Tahap 2. Dari gambar tersebut, terlihat masing-masing generator mengalami osilasi dengan titik terendah yang bervariasi. Generator STG 1-5A mengalami perubahan sudut rotor hingga 11° , kemudian kembali stabil pada sudut $-18,42^{\circ}$. Generator STG 1-6 mengalami perubahan sudut rotor hingga 29° dan kembali stabil pada $-17,70^{\circ}$. Generator STG 2-2 mengalami perubahan sudut rotor hingga 13° dan kembali stabil pada 0° . Generator STG 2-3 mengalami perubahan sudut rotor hingga 11° dan kembali stabil pada $0,73^{\circ}$. Generator STG New 1 relatif stabil dan tidak mengalami perubahan.

Berdasarkan data simulasi respon frekuensi, tegangan dan sudut rotor diatas dapat disimpulkan bahwa sistem masih dapat mempertahankan kestabilannya ketika terjadi kasus generator STG New 1 dan STG 2-1 *outage*. Terjadi Osilasi dari masing-masing respon tetapi menurut standar IEEE Std C37.106-2003, penurunan ataupun kenaikan yang terjadi masih diperkenankan.

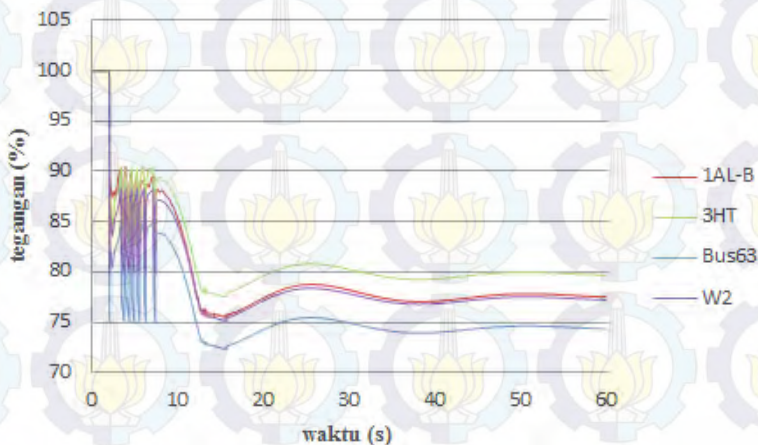
4.3.1.15 Studi Kasus Generator STG New 2 + Generator STG New 1 OFF: Generator Generator STG New 2 dan Generator STG New 1 Outage dari Sistem ($t=2s$)

Pada studi kasus ini akan ditampilkan hasil dari simulasi dan analisis kestabilan transien saat generator generator STG New 2 dan new 1 OFF di sisi *power plant* 3 dan 6 generator lainnya ON pada sistem kelistrikan PT. Pertamina RU V Balikpapan. Generator disimulasikan *outage* saat 2 detik setelah sistem bekerja dengan total waktu simulasi selama 60 detik.



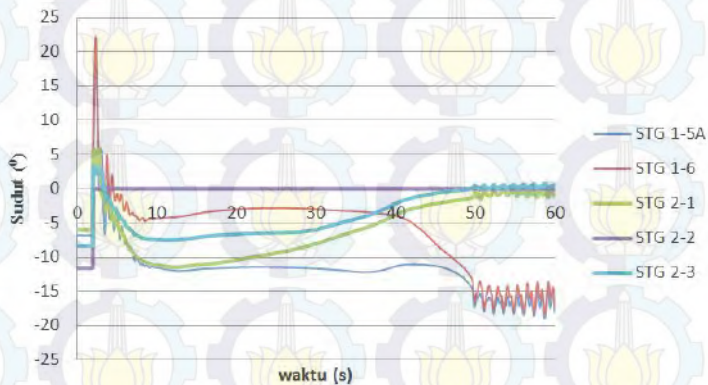
Gambar 4.43 Respon Frekuensi Saat Generator STG New 1 dan Generator STG New 2 Outage dari Sistem

Pada Gambar 4.43 menunjukkan bahwa frekuensi bus pada masing-masing level tegangan mengalami penurunan, akan tetapi sistem masih dapat mempertahankan kestabilannya. Penurunan frekuensi terendah mencapai 80,15% pada detik ke 32,6 s. Penurunan frekuensi terjadi karena suplai daya yang hilang dari generator generator STG New 2 dan new 1 dengan total sebesar 30 MW. Sistem kembali *steady state* pada 80,38% dari frekuensi normal. Berdasarkan kepada standar ANSI/IEEE C37.106-1987 penurunan frekuensi yang terjadi pada studi kasus ini tidak diperkenankan, sehingga dibutuhkan mekanisme *Load shedding* tahap 1.



Gambar 4.44 Respon Tegangan Saat Generator STG New 1 dan Generator STG New 2 *Outage* dari Sistem

Dari gambar 4.44 menunjukkan bahwa tegangan pada masing-masing bus mengalami penurunan saat detik ke-16. Bus 1AL-B mengalami penurunan tegangan hingga 75,02% dan kembali stabil pada 77,51%. Bus 3HT mengalami penurunan tegangan hingga 77,52% dan kembali stabil pada 79,67%. Bus 63 mengalami penurunan tegangan hingga 72,34% dan kembali stabil pada 74,34%. Bus W2 mengalami penurunan tegangan hingga 75,14% dan kembali stabil pada 77,22%. Penurunan tegangan yang terjadi karena beban-beban pada sistem tidak tersuplai secara penuh.



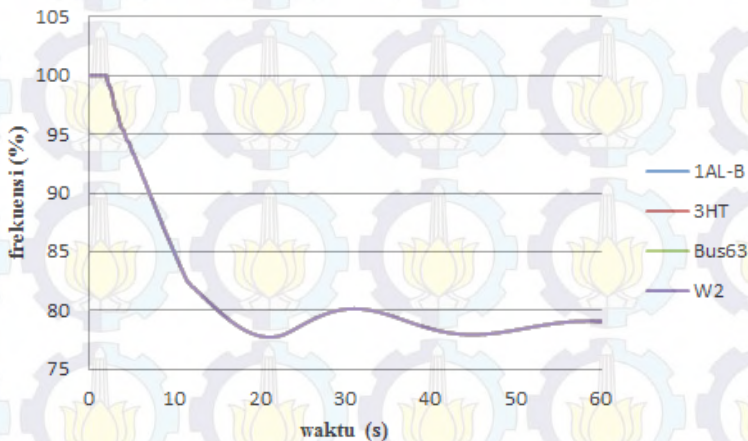
Gambar 4.45 Respon Sudut Rotor Saat Generator STG New 1 dan Generator STG New 2 *Outage* dari Sistem

Gambar 4.45 menunjukkan respon sudut rotor relatif terhadap swing generator dari masing-masing generator pada saat STG New 1 dan STG New 2 *outage*. Dari gambar tersebut, terlihat masing-masing generator mengalami osilasi dengan titik terendah yang bervariasi. Generator STG 1-5A mengalami perubahan sudut rotor hingga 26° , kemudian kembali stabil pada sudut $-19,23^{\circ}$. Generator STG 1-6 mengalami perubahan sudut rotor hingga 27° dan kembali stabil pada $-19,38^{\circ}$. Generator STG 2-1 mengalami perubahan sudut rotor hingga 12° dan kembali stabil pada 0° . Generator STG 2-2 mengalami perubahan sudut rotor hingga 12° dan kembali stabil pada $1,4^{\circ}$. Generator STG 2-3 mengalami perubahan sudut rotor hingga 12° dan kembali stabil pada $1,4^{\circ}$.

Berdasarkan data simulasi respon tegangan dan sudut rotor diatas dapat disimpulkan bahwa sistem masih dapat mempertahankan kestabilannya, akan tetapi respon frekuensi menunjukan bahwa sistem mengalami penurunan yang masih tidak diperkenankan berdasarkan dari standar ANSI/IEEE C37.106-1987. Sehingga dibutuhkan mekanisme *Load shedding* tahap 1.

4.3.1.16 Studi Kasus Generator STG New 1 + Generator STG New 2 OFF + LS3: Generator Generator STG New 1 dan Generator STG New 2 Outage dari Sistem ($t=2s$) dengan Load Shedding 1

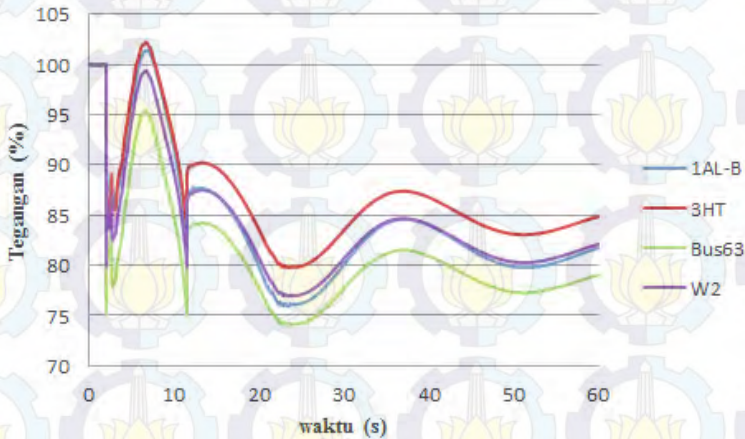
Pada studi kasus ini akan ditampilkan hasil dari simulasi dan analisis kestabilan transien saat generator STG New 1 dan STG New 2 OFF di sisi *power plant* 3 dan 6 generator lainnya ON diikuti dengan mekanisme pelepasan *load shedding* tahap 1 pada sistem kelistrikan PT. Pertamina RU V Balikpapan. Generator disimulasikan *outage* saat 2 detik setelah sistem bekerja dengan total waktu simulasi selama 60 detik. *Load shedding* tahap 1 dilakukan pada saat 2,64 s (2,52 s waktu pada saat sistem mengalami penurunan frekuensi minimal sesuai standar pelepasan beban 3 langkah + 0,12 s delay waktu) Standar *load shedding* yang digunakan pada tugas akhir ini adalah *load shedding* tiga langkah berdasar standar ANSI/IEEE C37.106-1987.



Gambar 4.46 Respon Frekuensi Saat Generator STG New 1 dan STG New 2 Outage dari Sistem dengan Mekanisme Load Shedding Tahap 1

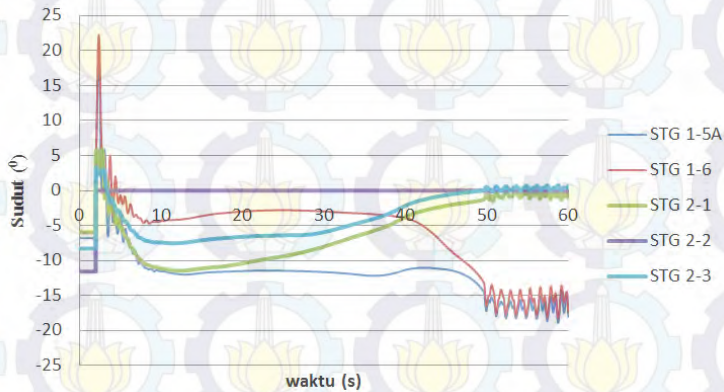
Pada Gambar 4.46 menunjukkan bahwa frekuensi bus pada masing-masing level tegangan mengalami penurunan, akan tetapi sistem masih dapat mempertahankan kestabilannya. Penurunan frekuensi terendah mencapai 77,73% pada detik ke 21,27 s. Penurunan frekuensi terjadi karena suplai daya yang hilang dari generator new 2 dan new 1 dengan total sebesar 30 MW. Sistem kembali *steady state* pada 79,08% dari frekuensi normal. Berdasarkan kepada standar ANSI/IEEE C37.106-

1987 penurunan frekuensi yang terjadi pada studi kasus ini tidak diperkenankan, sehingga dibutuhkan mekanisme *Load shedding* tahap 2.



Gambar 4.47 Respon Tegangan Saat Generator STG New 1 dan STG New 2 *Outage* dari Sistem dengan Mekanisme *Load Shedding* Tahap 1

Dari gambar 4.47 menunjukkan bahwa tegangan pada masing-masing bus mengalami penurunan saat detik ke-24. Bus 1AL-B mengalami penurunan tegangan hingga 75,93% dan kembali stabil pada 81,74%. Bus 3HT mengalami penurunan tegangan hingga 79,74% dan kembali stabil pada 84,86%. Bus 63 mengalami penurunan tegangan hingga 74,04% dan kembali stabil pada 79,04%. Bus W2 mengalami penurunan tegangan hingga 76,91% dan kembali stabil pada 82,09%. Penurunan tegangan yang terjadi karena beban-beban pada sistem tidak tersuplai secara penuh.



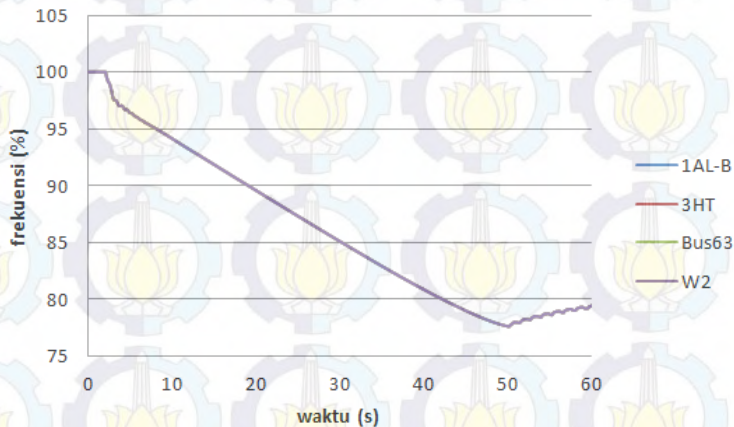
Gambar 4.45 Respon Sudut Rotor Saat Generator STG New 1 dan Generator STG New 2 *Outage* dari Sistem dengan Mekanisme *Load Shedding* Tahap 1

Gambar 4.45 menunjukkan respon sudut rotor relatif terhadap swing generator dari masing-masing generator pada saat STG New 1 dan STG New 2 *outage* kemudian dilanjutkan dengan mekanisme *load shedding* tahap 1. Dari gambar tersebut, terlihat masing-masing generator mengalami osilasi dengan titik terendah yang bervariasi. Generator STG 1-5A mengalami perubahan sudut rotor hingga 9° , kemudian kembali stabil pada sudut $-16,67^{\circ}$. Generator STG 1-6 mengalami perubahan sudut rotor hingga 12° dan kembali stabil pada $-17,13^{\circ}$. Generator STG 2-1 mengalami perubahan sudut rotor hingga 6° dan kembali stabil pada $-0,14^{\circ}$. Generator STG 2-2 mengalami perubahan sudut rotor hingga 12° dan kembali stabil pada 0° . Generator STG 2-3 mengalami perubahan sudut rotor hingga 9° dan kembali stabil pada $0,67^{\circ}$.

Berdasarkan data simulasi respon tegangan dan sudut rotor diatas dapat disimpulkan bahwa sistem masih dapat mempertahankan kestabilannya, akan tetapi respon frekuensi menunjukkan bahwa sistem mengalami penurunan yang masih tidak diperkenankan berdasarkan dari standar ANSI/IEEE C37.106-1987. Sehingga dibutuhkan mekanisme *load shedding* tahap 2.

4.3.1.17 Studi Kasus Generator STG New 1 + Generator STG New 2 OFF: Generator Generator STG New 1 dan Generator STG New 2 Outage dari Sistem ($t=2s$) dengan Load Shedding 2

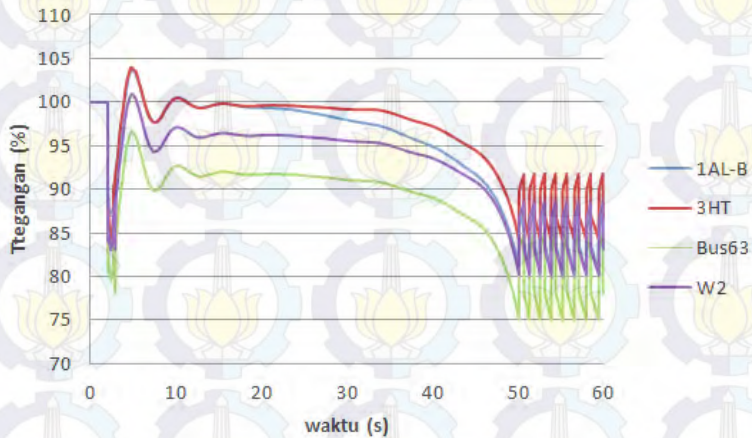
Pada studi kasus ini akan ditampilkan hasil dari simulasi dan analisis kestabilan transien saat generator STG New 2 dan STG New 1 OFF di sisi *power plant* 3 dan 6 generator lainnya ON diikuti dengan mekanisme pelepasan *load shedding* tahap 2 pada sistem kelistrikan PT. Pertamina RU V Balikpapan. Generator disimulasikan *outage* saat 2 detik setelah sistem bekerja dengan total waktu simulasi selama 60 detik. *Load shedding* tahap 2 dilakukan pada saat 2,86 s (2,74 s waktu pada saat sistem mengalami penurunan frekuensi minimal sesuai standar pelepasan beban 3 langkah + 0,12 s delay waktu) Standar *load shedding* yang digunakan pada tugas akhir ini adalah *load shedding* tiga langkah berdasar standar ANSI/IEEE C37.106-1987.



Gambar 4.49 Respon Frekuensi Saat Generator STG New 1 dan Generator STG New 2 Outage dari Sistem dengan Mekanisme Load Shedding Tahap 2

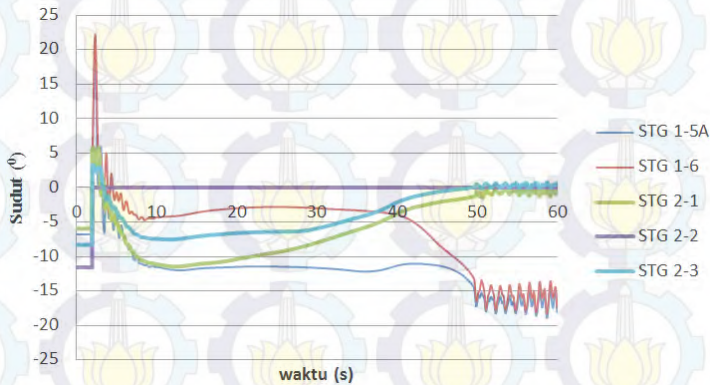
Pada Gambar 4.49 menunjukkan bahwa frekuensi bus pada masing-masing level tegangan mengalami penurunan, akan tetapi sistem masih dapat mempertahankan kestabilannya. Penurunan frekuensi terendah mencapai 77,73% pada detik ke 21,27 s. Penurunan frekuensi terjadi karena suplai daya yang hilang dari generator new 2 dan new 1 dengan total sebesar 30 MW. Sistem kembali *steady state* pada 79,08% dari frekuensi normal. Berdasarkan kepada standar ANSI/IEEE C37.106-1987 penurunan frekuensi yang terjadi pada studi kasus ini

tidak diperkenankan, sehingga dibutuhkan mekanisme *Load shedding* tahap 3.



Gambar 4.50 Respon Tegangan Saat Generator STG New 1 dan Generator STG New 2 *Outage* dari Sistem dengan Mekanisme *Load Shedding* Tahap 2

Dari gambar 4.50 menunjukkan bahwa tegangan pada masing-masing bus mengalami penurunan saat detik ke-24. Bus 1AL-B mengalami penurunan tegangan hingga 75,93% dan kembali stabil pada 81,74%. Bus 3HT mengalami penurunan tegangan hingga 79,74% dan kembali stabil pada 84,86%. Bus 63 mengalami penurunan tegangan hingga 74,04% dan kembali stabil pada 79,03%. Bus W2 mengalami penurunan tegangan hingga 76,91% dan kembali stabil pada 82,09%. Penurunan tegangan yang terjadi karena beban-beban pada sistem tidak tersuplai secara penuh.



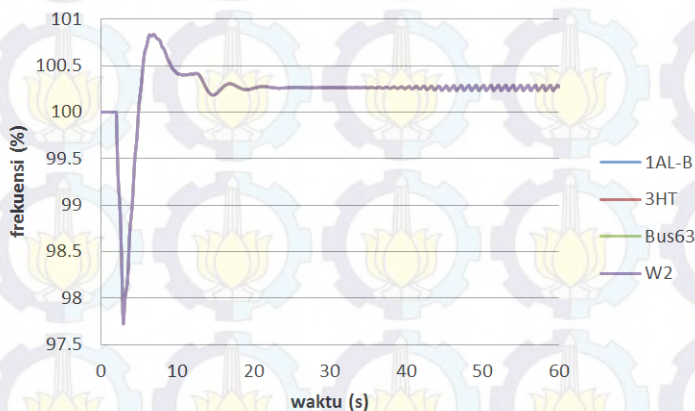
Gambar 4.51 Respon Sudut Saat Generator STG New 1 dan Generator STG New 2 *Outage* dari Sistem dengan Mekanisme *Load Shedding* Tahap 2

Gambar 4.51 menunjukkan respon sudut rotor relatif terhadap swing generator dari masing-masing generator pada saat STG New 1 dan STG New 2 *outage* dilanjutkan dengan dengan mekanisme *load shedding* tahap 2. Dari gambar tersebut, terlihat masing-masing generator mengalami osilasi dengan titik terendah yang bervariasi. Generator STG 1-5A mengalami perubahan sudut rotor hingga 12° , kemudian kembali stabil pada sudut $-18,23^{\circ}$. Generator STG 1-6 mengalami perubahan sudut rotor hingga 26° dan kembali stabil pada $-16,78^{\circ}$. Generator STG 2-1 mengalami perubahan sudut rotor hingga 6° dan kembali stabil pada $-0,14^{\circ}$. Generator STG 2-2 mengalami perubahan sudut rotor hingga 12° dan kembali stabil pada 0° . Generator STG 2-3 mengalami perubahan sudut rotor hingga 9° dan kembali stabil pada $0,71^{\circ}$.

Berdasarkan data simulasi respon tegangan dan sudut rotor diatas dapat disimpulkan bahwa sistem masih dapat mempertahankan kestabilannya, akan tetapi respon frekuensi menunjukan bahwa sistem mengalami penurunan yang masih tidak diperkenankan berdasarkan dari standar ANSI/IEEE C37.106-1987. Sehingga dibutuhkan mekanisme *Load shedding* tahap 3.

4.3.1.18 Studi Kasus Generator STG New 1 + Generator STG New 2 OFF+ LS3: Generator Generator STG New 1 dan Generator STG New 2 Outage dari Sistem ($t=2s$) dengan Load Shedding 3

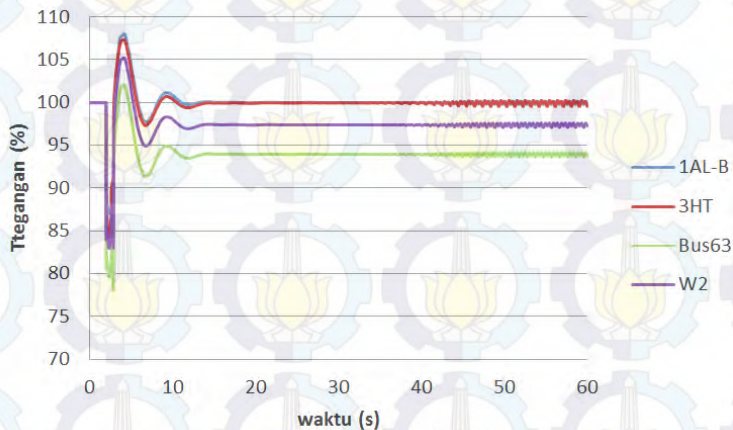
Pada studi kasus ini akan ditampilkan hasil dari simulasi dan analisis kestabilan transien saat generator STG New 2 dan STG New 1 OFF di sisi *power plant* 3 dan 6 generator lainnya ON diikuti dengan mekanisme pelepasan *load shedding* tahap 3 pada sistem kelistrikan PT. Pertamina RU V Balikpapan. Generator disimulasikan *outage* saat 2 detik setelah sistem bekerja dengan total waktu simulasi selama 60 detik. *Load shedding* tahap 3 dilakukan pada saat 2,876 s (2,756 s waktu pada saat sistem mengalami penurunan frekuensi minimal sesuai standar pelepasan beban 3 langkah + 0,12 s delay waktu). Standar *load shedding* yang digunakan pada tugas akhir ini adalah *load shedding* tiga langkah berdasar standar ANSI/IEEE C37.106-1987.



Gambar 4.52 Respon Frekuensi Saat Generator STG New 1 dan Generator STG New 2 Outage dari Sistem dengan Mekanisme Load Shedding Tahap 3

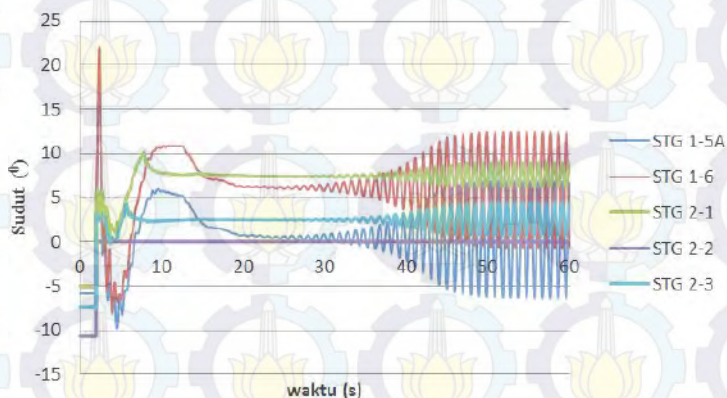
Pada Gambar 4.52 menunjukkan bahwa frekuensi bus pada masing-masing level tegangan mengalami penurunan, akan tetapi sistem masih dapat mempertahankan kestabilannya. Penurunan frekuensi terendah mencapai 97,72% pada detik ke 2 s. Penurunan frekuensi terjadi karena suplai daya yang hilang dari generator STG new 2 dan STG New 1 dengan total sebesar 30 MW. Sistem kembali *steady state* pada 100,27% dari frekuensi normal. Berdasarkan kepada standar

ANSI/IEEE C37.106-1987 penurunan frekuensi yang terjadi pada studi kasus ini masih diperkenankan.



Gambar 4.53 Respon Tegangan Saat Generator STG New 1 dan Generator STG New 2 *Outage* dari Sistem dengan Mekanisme *Load Shedding* Tahap 3

Dari gambar 4.53 menunjukkan bahwa tegangan pada masing-masing bus mengalami penurunan saat detik ke-2. Bus 1AL-B mengalami penurunan tegangan hingga 84,32% dan kembali stabil pada 99,86%. Bus 3HT mengalami penurunan tegangan hingga 83,98% dan kembali stabil pada 99,56%. Bus 63 mengalami penurunan tegangan hingga 78,01% dan kembali stabil pada 93,83%. Bus W2 mengalami penurunan tegangan hingga 82,97% dan kembali stabil pada 97,27%. Penurunan tegangan yang terjadi karena beban-beban pada sistem tidak tersuplai secara penuh.



Gambar 4.54 Respon Sudut Saat Generator STG New 1 dan Generator STG New 2 *Outage* dari Sistem dengan Mekanisme *Load Shedding* Tahap 3

Gambar 4.54 menunjukkan respon sudut rotor relatif terhadap swing generator dari masing-masing generator pada saat STG New 1 dan STG New 2 *outage* dilanjutkan dengan dengan mekanisme *load shedding* tahap 2. Dari gambar tersebut, terlihat masing-masing generator mengalami osilasi dengan titik terendah yang bervariasi. Generator STG 1-5A mengalami perubahan sudut rotor hingga 3° , kemudian kembali stabil pada sudut $6,66^{\circ}$. Generator STG 1-6 mengalami perubahan sudut rotor hingga 16° dan kembali stabil pada $-5,55^{\circ}$. Generator STG 2-1 mengalami perubahan sudut rotor hingga 10° dan kembali stabil pada $8,76^{\circ}$. Generator STG 2-2 mengalami perubahan sudut rotor hingga 10° dan kembali stabil pada 0° . Generator STG 2-3 mengalami perubahan sudut rotor hingga 12° dan kembali stabil pada $4,34^{\circ}$.

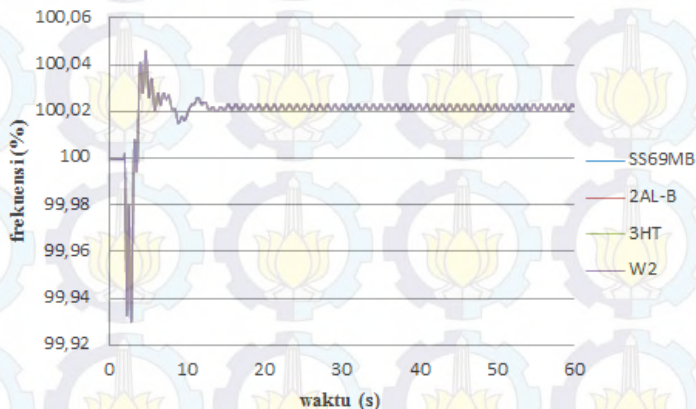
Berdasarkan data simulasi respon frekuensi, tegangan dan sudut rotor diatas dapat disimpulkan bahwa sistem masih dapat mempertahankan kestabilannya ketika terjadi kasus generator STG 1-5A dan STG 1-6 *outage*. Terjadi Osilasi dari masing-masing respon tetapi menurut standar IEEE Std C37.106-2003, penurunan ataupun kenaikan yang terjadi masih diperkenankan.

4.3.2. Simulasi Kestabilan Transien *Short Circuit*

Pada sub bab 4.3.2. akan dilakukan simulasi kestabilan transien untuk studi kasus ketika terjadi *short circuit* pada masing-masing bus pada level tegangan yang berbeda.

4.3.2.1 Studi Kasus SC 0,38 kV: Gangguan Hubung Singkat 3 Fasa di Bus 0,38 kV ($t=2$ s)

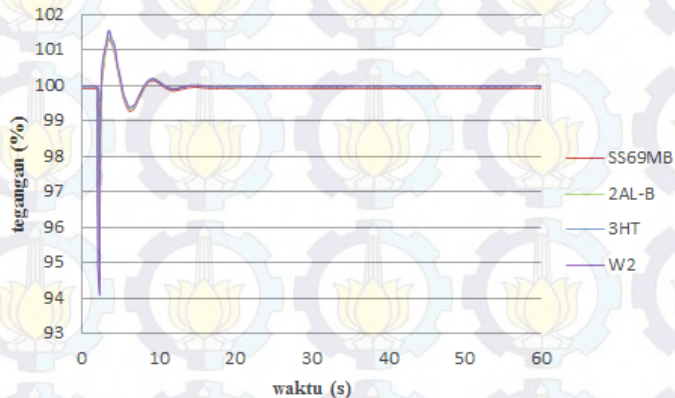
Pada kasus SC 0,38 kV disimulasikan sistem mengalami gangguan hubung singkat 3 fasa saat detik ke-2 pada bus SS69MA dengan rating tegangan 0,38 kV. *CB* 69LA S2 *open* untuk mengatasi gangguan dan melindungi sistem. *Setting relay* waktu *CB* saat $t= 0,3$ detik ($0,1$ s *setting relay* + $0,2$ s waktu sensing dan waktu *open circuit breaker*). Sedangkan pada saat simulasi waktu total pengamatan respon frekuensi, tegangan , dan sudut rotor adalah 60 s.



Gambar 4.55 Respon Frekuensi Saat Terjadi Gangguan Hubung Singkat di Bus SS69MA

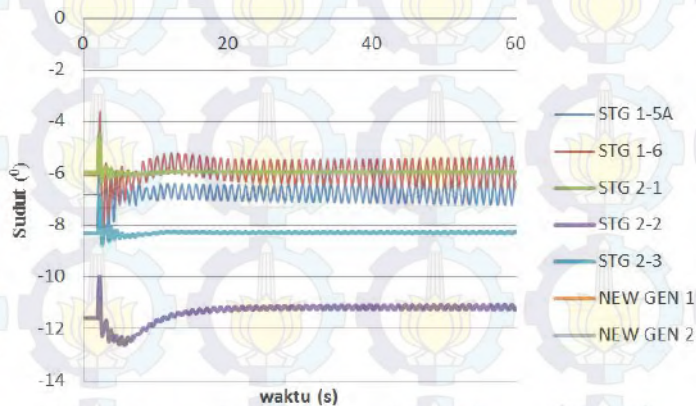
Gambar 4.55 Menunjukkan respon frekuensi bus pada saat hubung singkat bus SS69 MA diikuti *CB* open pada $t = 0,3$ s. Dari gambar menunjukkan bahwa frekuensi bus pada masing-masing level tegangan mengalami penurunan, akan tetapi sistem masih dapat mempertahankan kestabilannya. Penurunan frekuensi terendah mencapai 98,72% pada detik ke 5,30 s. Sistem kembali *steady state* pada 100,00% dari frekuensi normal. Berdasarkan kepada standar ANSI/IEEE C37.106-

1987 penurunan frekuensi yang terjadi pada studi kasus ini masih diperkenankan.



Gambar 4.56 Respon Tegangan Saat Terjadi Gangguan Hubung Singkat di Bus SS69MA

Gambar 4.56 Menunjukkan respon tegangan bus pada saat hubung singkat bus SS69 MA diikuti *CB* open pada $t = 0,3$ s. Dari gambar menunjukkan bahwa tegangan pada masing-masing bus mengalami penurunan saat detik ke-2. Bus 1AL-B mengalami penurunan tegangan hingga 93,12% dan kembali stabil pada 99,98%. Bus 2AL-B mengalami penurunan tegangan hingga 93,33% dan kembali stabil pada 99,99%. Bus 3HT mengalami penurunan tegangan hingga 91,94% dan kembali stabil pada 100,00%. Bus W2 mengalami penurunan tegangan hingga 90,71% dan kembali stabil pada 99,98%. Bus SS69MB mengalami penurunan tegangan hingga 93,29% dan kembali stabil pada 99,94%. Dengan demikian dapat disimpulkan bahwa kondisi tegangan sistem pada saat studi kasus ini masih dalam batas aman.



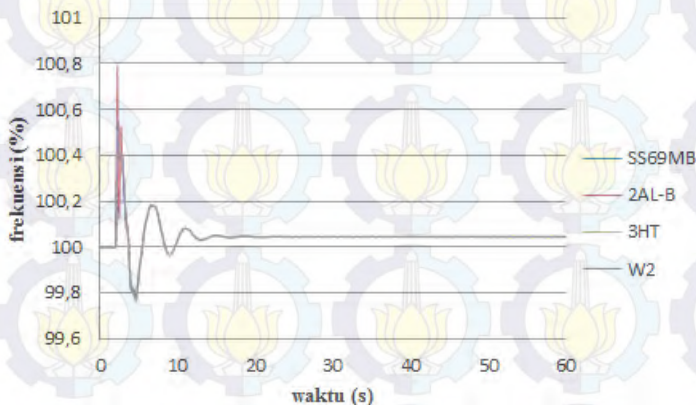
Gambar 4.57 Respon Sudut Rotor Saat Terjadi Gangguan Hubung Singkat di Bus SS69MA

Gambar 4.57 menunjukkan respon sudut rotor relatif terhadap swing generator dari masing-masing generator pada saat SC di BUS SS69MA. Dari gambar tersebut, terlihat masing-masing generator mengalami osilasi berkelanjutan hingga *steady state*. Generator STG 1-5A mengalami perubahan sudut rotor hingga 2° , kemudian kembali stabil dan berosilasi pada range sudut rotor $-6,3^{\circ}$ sampai $-7,9^{\circ}$. Generator STG 1-6 mengalami perubahan sudut rotor hingga 3° , kemudian kembali stabil dan berosilasi pada range sudut rotor $-6,3^{\circ}$ sampai $-6,6^{\circ}$. Generator STG 2-1 mengalami perubahan sudut rotor hingga 1° dan kembali stabil pada $-5,95^{\circ}$. Generator STG 2-2 mengalami perubahan sudut rotor hingga 2° dan kembali stabil pada $-11,26^{\circ}$. Generator STG 2-3 mengalami perubahan sudut rotor hingga 1° dan kembali stabil pada $-8,26^{\circ}$. Generator STG NEW 1 relatif stabil dan tidak mengalami perubahan. Generator STG NEW 2 relatif stabil dan tidak mengalami perubahan.

Berdasarkan data simulasi respon frekuensi, tegangan dan sudut rotor diatas dapat disimpulkan bahwa sistem masih dapat mempertahankan kestabilannya ketika terjadi kasus hubung singkat pada Bus SS69MA. Terjadi Osilasi dari masing-masing respon akan tetapi menurut standar IEEE Std C37.106-2003, penurunan ataupun kenaikan yang terjadi masih diperkenankan.

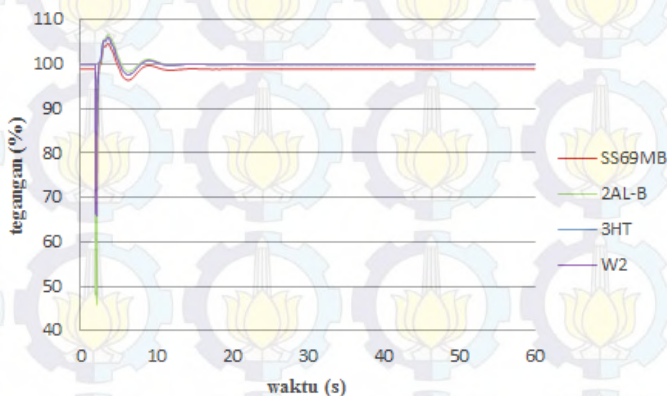
4.3.2.2 Studi Kasus SC 6,6 kV: Gangguan Hubung Singkat 3 Fasa di Bus 6.6 kV ($t=2$ s)

Pada kasus SC 6,6 kV disimulasikan sistem mengalami gangguan hubung singkat 3 fasa saat detik ke-2 pada bus 1AL-B dengan rating tegangan 6,6 kV. *CB* 1AL13 *open* untuk mengatasi gangguan dan melindungi sistem. *Setting relay* waktu *CB* saat $t=0,5$ s ($0,3$ s *setting relay* + $0,2$ s waktu *sensing* dan waktu *open circuit breaker*). Sedangkan pada saat simulasi waktu total pengamatan respon frekuensi, tegangan , dan sudut rotor adalah 60 s.



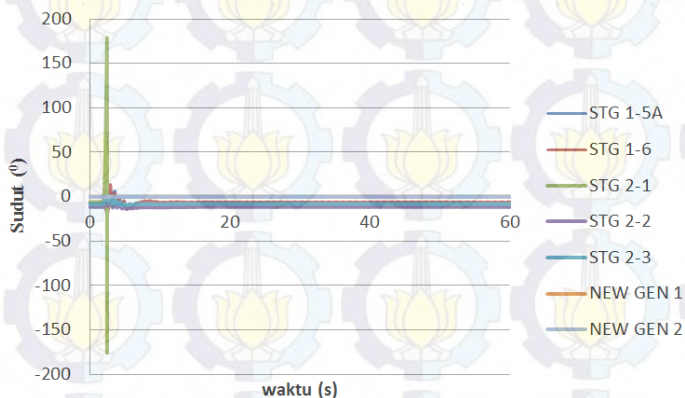
Gambar 4.58 Respon Frekuensi Saat Terjadi Gangguan Hubung Singkat di Bus 1AL-B

Gambar 4.58 Menunjukkan respon tegangan bus pada saat hubung singkat bus 1AL-B diikuti *CB* open pada $t=0,5$ s. Dari gambar menunjukkan bahwa frekuensi bus pada masing-masing level tegangan mengalami kenaikan, akan tetapi sistem masih dapat mempertahankan kestabilannya. Kenaikan frekuensi tertinggi mencapai 100,79% pada detik ke 2,22 s. Sistem kembali *steady state* pada 100,43% dari frekuensi normal. Berdasarkan kepada standar ANSI/IEEE C37.106-1987 penurunan frekuensi yang terjadi pada studi kasus ini masih diperkenankan.



Gambar 4.59 Respon Tegangan Saat Terjadi Gangguan Hubung Singkat di Bus 1AL-B

Gambar 4.59 Menunjukkan respon tegangan bus pada saat hubung singkat bus 1AL-B diikuti *CB* open pada $t = 0,5$ s. Dari gambar menunjukkan bahwa tegangan pada masing-masing bus mengalami penurunan saat detik ke-2. Bus 1AL-B mengalami penurunan tegangan hingga 93,12% dan kembali stabil pada 99,98%. Bus 2AL-B mengalami penurunan tegangan hingga 45,84% dan kembali stabil pada 99,98%. Bus 3HT mengalami penurunan tegangan hingga 71,85% dan kembali stabil pada 99,98%. Bus W2 mengalami penurunan tegangan hingga 65,79% dan kembali stabil pada 100,00%. Bus SS69MA mengalami penurunan tegangan hingga 75,63% dan kembali stabil pada 98,91%. Penurunan tegangan hingga kurang dari 60% dari tegangan nominal akan menyebabkan kontaktor pada bus yang bersangkutan *trip*. Dengan demikian diperlukan pengaturan *relay undervoltage* agar pada saat terjadi gangguan kontinuitas pelayanan daya dapat terus terjaga.



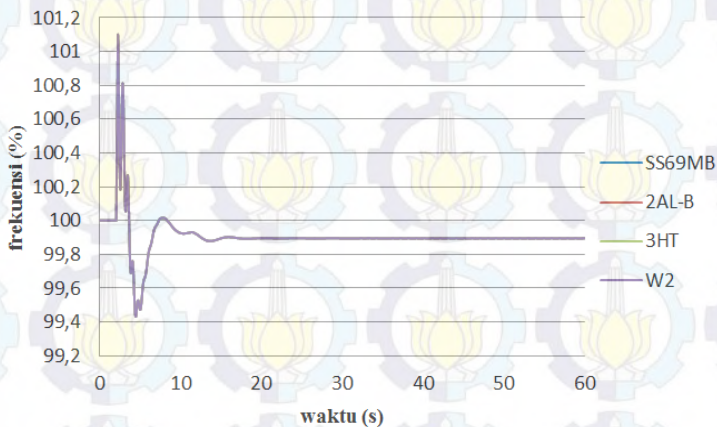
Gambar 4.60 Respon Sudut Rotor Saat Terjadi Gangguan Hubung Singkat di Bus 1AL-B

Gambar 4.60 menunjukkan respon sudut rotor relatif terhadap swing generator dari masing-masing generator pada saat SC di Bus 1AL-B. Dari gambar tersebut, terlihat masing-masing generator mengalami osilasi berkelanjutan hingga *steady state*. Generator STG 1-5A mengalami perubahan sudut rotor hingga 7° , kemudian kembali stabil dan berosilasi pada range sudut rotor $-6,64^{\circ}$ sampai $-6,69^{\circ}$. Generator STG 1-6 mengalami perubahan sudut rotor hingga 15° , kemudian kembali stabil dan berosilasi pada range sudut rotor $-5,27^{\circ}$ sampai $-6,23^{\circ}$. Generator STG 2-1 mengalami perubahan sudut rotor hingga 162° dan kembali stabil pada 0° . Generator STG 2-2 mengalami perubahan sudut rotor hingga 13° dan kembali stabil pada $-11,58^{\circ}$. Generator STG 2-3 mengalami perubahan sudut rotor hingga 2° dan kembali stabil pada $-8,82^{\circ}$. Generator STG NEW 1 relatif stabil dan tidak mengalami perubahan. Generator STG NEW 2 relatif stabil dan tidak mengalami perubahan.

Berdasarkan data simulasi respon frekuensi, tegangan dan sudut rotor diatas dapat disimpulkan bahwa sistem masih dapat mempertahankan kestabilannya ketika terjadi kasus hubung singkat pada Bus 1AL-B. Terjadi Osilasi dari masing-masing respon akan tetapi menurut standar IEEE Std C37.106-2003, penurunan ataupun kenaikan yang terjadi masih diperkenankan.

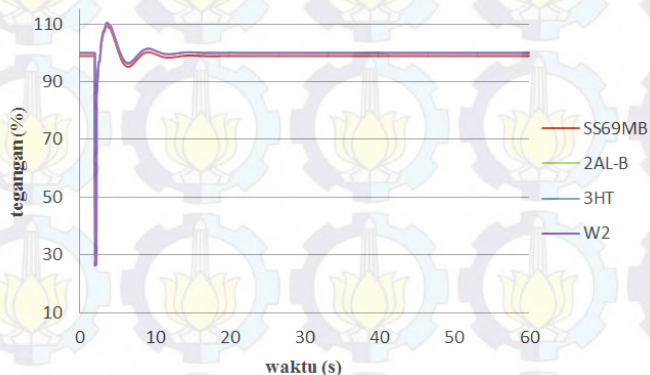
4.3.2.3 Studi Kasus SC 11 kV: Gangguan Hubung Singkat 3 Fasa di Bus 11 kV ($t=2$ s)

Pada kasus SC 11 kV disimulasikan sistem mengalami gangguan hubung singkat 3 fasa saat detik ke-2 pada bus bus63 dengan rating tegangan 11 kV. *CB* CB25, CB27, CB31 *open* untuk mengatasi gangguan dan melindungi sistem. *Setting relay* waktu *CB* saat $t= 0,3$ s ($0,1$ s *setting relay* + $0,2$ s waktu *sensing* dan waktu *open circuit breaker*). Sedangkan pada saat simulasi waktu total pengamatan respon frekuensi, tegangan , dan sudut rotor adalah 60 s.



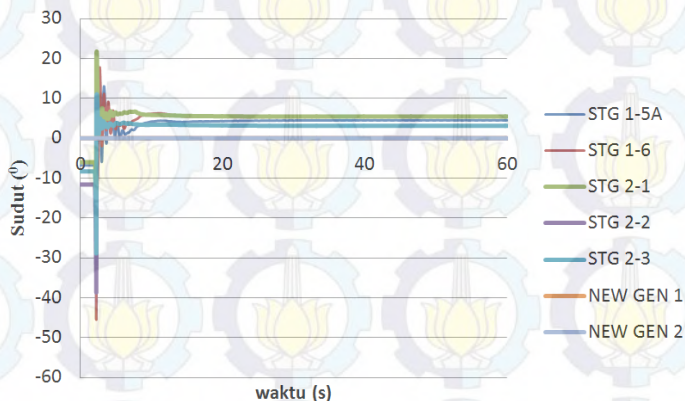
Gambar 4.61 Respon Frekuensi Saat Terjadi Gangguan Hubung Singkat di Bus Bus63

Gambar 4.61 Menunjukkan respon frekuensi bus pada saat hubung singkat bus Bus63 diikuti *CB* open pada $t = 0,3$ s. Dari gambar menunjukkan bahwa frekuensi bus pada masing-masing level tegangan mengalami kenaikan, akan tetapi sistem masih dapat mempertahankan kestabilannya. Kenaikan frekuensi tertinggi mencapai 101,78% pada detik ke 2,23 s. Sistem kembali *steady state* pada 99,89% dari frekuensi normal. Berdasarkan kepada standar ANSI/IEEE C37.106-1987 penurunan frekuensi yang terjadi pada studi kasus ini masih diperkenankan.



Gambar 4.62 Respon Tegangan Saat Terjadi Gangguan Hubung Singkat di Bus Bus63

Gambar 4.62 Menunjukkan respon tegangan bus pada saat hubung singkat bus Bus63 diikuti *CB* open pada $t = 0,3 \text{ s}$. Dari gambar menunjukkan bahwa tegangan pada masing-masing bus mengalami penurunan saat detik ke-2. Bus 2AL-B mengalami penurunan tegangan hingga 45,84% dan kembali stabil pada 99,98%. Bus 3HT mengalami penurunan tegangan hingga 71,85% dan kembali stabil pada 99,98%. Bus W2 mengalami penurunan tegangan hingga 65,79% dan kembali stabil pada 100,00%. Bus SS69MA mengalami penurunan tegangan hingga 75,63% dan kembali stabil pada 98,91%. Penurunan tegangan hingga kurang dari 60% dari tegangan nominal akan menyebabkan kontaktor pada bus yang bersangkutan *trip*. Dengan demikian diperlukan pengaturan *relay undervoltage* agar pada saat terjadi gangguan kontinuitas pelayanan daya dapat terus terjaga.



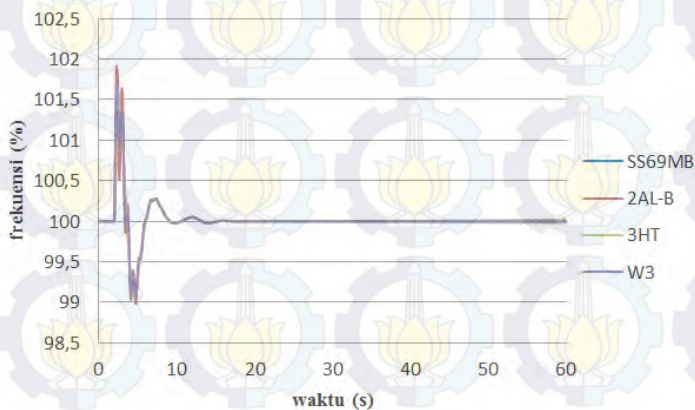
Gambar 4.63 Respon Sudut Rotor Saat Terjadi Gangguan Hubung Singkat di Bus Bus63

Gambar 4.63 menunjukkan respon sudut rotor relatif terhadap swing generator dari masing-masing generator pada saat SC di bus Bus63. Dari gambar tersebut, terlihat masing-masing generator mengalami osilasi berkelanjutan hingga *steady state*. Generator STG 1-5A mengalami perubahan sudut rotor hingga 39° , kemudian kembali stabil dan berosilasi pada range sudut rotor $-4,46^\circ$ sampai $-4,53^\circ$. Generator STG 1-6 mengalami perubahan sudut rotor hingga 39° , kemudian kembali stabil dan berosilasi pada range sudut rotor $5,28^\circ$ sampai $5,32^\circ$. Generator STG 2-1 mengalami perubahan sudut rotor hingga 12° dan kembali stabil pada $5,47^\circ$. Generator STG 2-2 mengalami perubahan sudut rotor hingga $12,92^\circ$ dan kembali stabil pada 0° . Generator STG 2-3 mengalami perubahan sudut rotor hingga 20° dan kembali stabil pada $3,13^\circ$. Generator STG NEW 1 relatif stabil dan tidak mengalami perubahan. Generator STG NEW 2 relatif stabil dan tidak mengalami perubahan.

Berdasarkan data simulasi respon frekuensi, tegangan dan sudut rotor diatas dapat disimpulkan bahwa sistem masih dapat mempertahankan kestabilannya ketika terjadi kasus hubung singkat pada Bus Bus63. Terjadi Osilasi dari masing-masing respon akan tetapi menurut standar IEEE Std C37.106-2003, penurunan ataupun kenaikan yang terjadi masih diperkenankan.

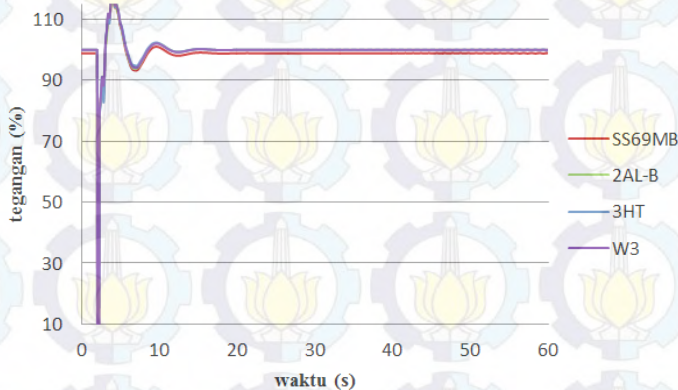
4.3.2.3 Studi Kasus SC 33 kV: Gangguan Hubung Singkat 3 Fasa di Bus 33 kV ($t=2$ s)

Pada kasus SC 33 kV disimulasikan sistem mengalami gangguan hubung singkat 3 fasa saat detik ke-2 pada bus W2 dengan rating tegangan 33 kV. *Setting relay differential* yang melindungi bus W2 adalah 3 *cyle*(0,06 s). Pada simulasi *relay* waktu CB saat $t=0,26$ s (0,06 s *setting relay* + 0,2 s waktu sensing dan waktu *open circuit breaker*). Sedangkan pada saat simulasi waktu total pengamatan respon frekuensi, tegangan, dan sudut rotor adalah 60 s.



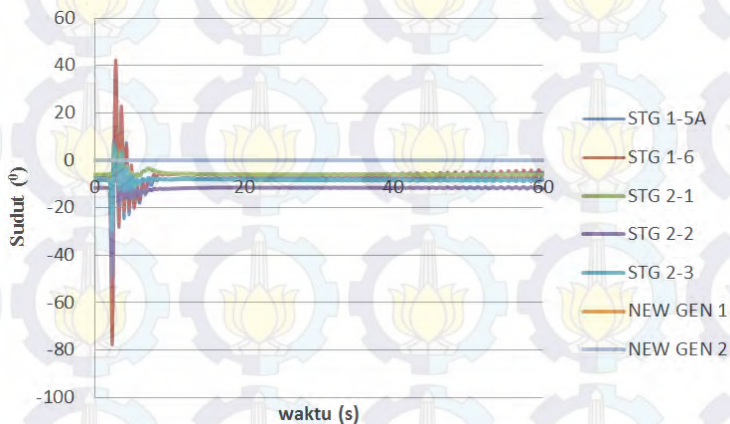
Gambar 4.64 Respon Frekuensi Saat Terjadi Gangguan Hubung Singkat di Bus W2

Gambar 4.64 Menunjukkan respon frekuensi bus pada saat hubung singkat bus W2 diikuti CB open pada $t = 0,26$ s. Dari gambar menunjukkan bahwa frekuensi bus pada masing-masing level tegangan mengalami kenaikan, akan tetapi sistem masih dapat mempertahankan kestabilannya. Kenaikan frekuensi tertinggi mencapai 101,63% pada detik ke 2,36 s. Sistem kembali *steady state* pada 99,99% dari frekuensi normal. Berdasarkan kepada standar ANSI/IEEE C37.106-1987 penurunan frekuensi yang terjadi pada studi kasus ini masih diperkenankan.



Gambar 4.65 Respon Tegangan Saat Terjadi Gangguan Hubung Singkat di Bus W2

Gambar 4.65 Menunjukkan respon tegangan bus pada saat hubung singkat bus Bus W2 diikuti *CB* open pada $t = 0,26$ s. Dari gambar menunjukkan bahwa tegangan pada masing-masing bus mengalami penurunan saat detik ke-2. Bus 2AL-B mengalami penurunan tegangan hingga 31,77% dan kembali stabil pada 99,97%. Bus 3HT mengalami penurunan tegangan hingga 15,45% dan kembali stabil pada 99,83%. Bus SS69MA mengalami penurunan tegangan hingga 29,34% dan kembali stabil pada 98,95%. Penurunan tegangan hingga kurang dari 60% dari tegangan nominal akan menyebabkan kontaktor pada bus yang bersangkutan *trip*. Dengan demikian diperlukan pengaturan *relay undervoltage* agar pada saat terjadi gangguan kontinuitas pelayanan daya dapat terus terjaga.



Gambar 4.66 Respon Sudut Rotor Saat Terjadi Gangguan Hubung Singkat di Bus W2

Gambar 4.66 menunjukkan respon sudut rotor relatif terhadap swing generator dari masing-masing generator pada saat SC di Bus W2. Dari gambar tersebut, terlihat masing-masing generator mengalami osilasi berkelanjutan hingga *steady state*. Generator STG 1-5A mengalami perubahan sudut rotor hingga 70° , kemudian kembali stabil dan berosilasi pada range sudut rotor $-4,5^{\circ}$ sampai $-9,15^{\circ}$. Generator STG 1-6 mengalami perubahan sudut rotor hingga 71° , kemudian kembali stabil dan berosilasi pada range sudut rotor $-3,96^{\circ}$ sampai $-8,23^{\circ}$. Generator STG 2-1 mengalami perubahan sudut rotor hingga 4° dan kembali stabil pada $-5,97^{\circ}$. Generator STG 2-2 mengalami perubahan sudut rotor hingga 37° dan kembali stabil pada $-11,89^{\circ}$. Generator STG 2-3 mengalami perubahan sudut rotor hingga 21° dan kembali stabil pada $-8,15^{\circ}$. Generator STG NEW 1 relatif stabil dan tidak mengalami perubahan. Generator STG NEW 2 relatif stabil dan tidak mengalami perubahan.

Berdasarkan data simulasi respon frekuensi, tegangan dan sudut rotor diatas dapat disimpulkan bahwa sistem masih dapat mempertahankan kestabilannya ketika terjadi kasus hubung singkat pada Bus W2. Terjadi Osilasi dari masing-masing respon akan tetapi menurut

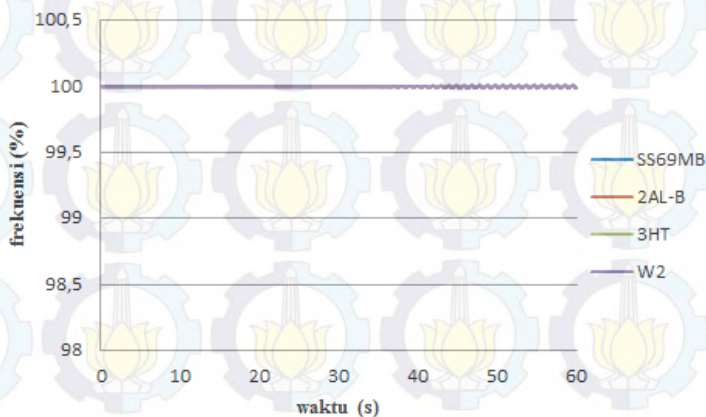
standar IEEE Std C37.106-2003, penurunan ataupun kenaikan yang terjadi masih diperkenankan.

4.3.3. Simulasi Kestabilan Transien *Motor Starting*

Pada sub bab 4.3.3. akan dilakukan simulasi kestabilan transien untuk studi kasus ketika terjadi *starting motor* dengan kapasitas yang terbesar.

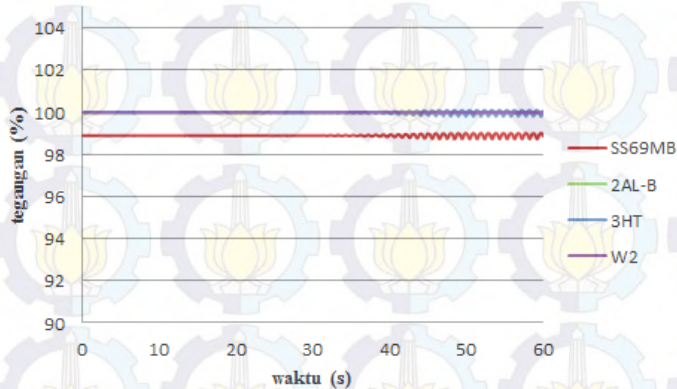
4.3.3.3 Studi Kasus Motor GM-3-01-C Start

Pada kasus ini akan disimulasikan, motor dengan ID GM-3-01 yang berkapasitas 1890 kW starting dengan metode *direct-online* pada detik ke-2 saat 8 generator ON di sistem kelistrikan PT. Pertamina RU V Balikpapan. Pada simulasi waktu *CB* motor ON saat $t = 2,2$ s. Sedangkan pada saat simulasi waktu total pengamatan respon frekuensi, tegangan, dan sudut rotor adalah 60 s.



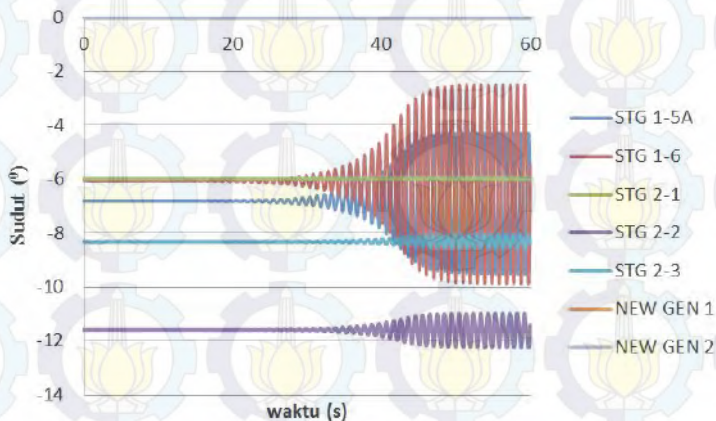
Gambar 4.67 Respon Frekuensi saat *Starting* Motor GM-3-01-C

Gambar 4.67 menunjukkan bahwa respon frekuensi bus pada saat GM-3-01 *start* pada $t = 2$ s. Dari gambar menunjukkan bahwa frekuensi bus pada masing-masing level tegangan relatif stabil yaitu sekitar 100%, akan tetapi terjadi sedikit osilasi frekuensi pada $t > 40$ s. Berdasarkan kepada standar ANSI/IEEE C37.106-1987 osilasi frekuensi yang terjadi pada studi kasus ini masih diperkenankan.



Gambar 4.68 Respon Tegangan saat *Starting* Motor GM-3-01-C

Gambar 4.68 menunjukkan respon tegangan bus pada saat GM-3-01-C *start* pada $t = 2$ s. Dari gambar menunjukkan bahwa tegangan pada masing-masing bus relatif stabil. Bus 2AL-B mengalami penurunan tegangan hingga 99,97% dan kembali stabil pada 99,98%. Bus 3HT mengalami penurunan tegangan hingga 99,97 % dan kembali stabil pada 99,98%. Bus SS69MA mengalami penurunan tegangan hingga 99,79% dan kembali stabil pada 99,80%. Dengan demikian dapat disimpulkan bahwa kondisi tegangan sistem pada saat studi kasus ini masih dalam batas aman.



Gambar 4.69 Respon Sudut Rotor saat *Starting* Motor GM-3-01-C

Gambar 4.69 menunjukkan respon sudut rotor relatif terhadap swing generator dari masing-masing generator pada saat GM-3-01-C *start* pada $t=2s$. Dari gambar tersebut, terlihat masing-masing generator mengalami osilasi berkelanjutan hingga *steady state*. Generator STG 1-5A mengalami perubahan sudut rotor hingga 5° , kemudian kembali stabil dan berosilasi pada range sudut rotor $-4,27^\circ$ sampai $-9,52^\circ$. Generator STG 1-6 mengalami perubahan sudut rotor hingga 4° , kemudian kembali stabil dan berosilasi pada range sudut rotor $-2,56^\circ$ sampai $-9,51^\circ$. Generator STG 2-1 mengalami perubahan sudut rotor yang sangat kecil dan relatif stabil pada sudut $-5,97^\circ$. Generator STG 2-2 mengalami perubahan sudut rotor hingga 1° , kemudian kembali stabil dan berosilasi pada range sudut rotor $-10,29^\circ$ sampai $-11,77^\circ$. Generator STG 2-3 mengalami perubahan sudut rotor yang sangat kecil dan relatif stabil pada sudut $-8,29^\circ$. Generator STG NEW 1 relatif stabil dan tidak mengalami perubahan. Generator STG NEW 2 relatif stabil dan tidak mengalami perubahan.

Berdasarkan data simulasi respon frekuensi, tegangan dan sudut rotor diatas dapat disimpulkan bahwa sistem masih dapat mempertahankan kestabilannya ketika terjadi kasus Motor *Starting* GM-3-01-C. Terjadi Osilasi dari masing-masing respon akan tetapi menurut standar IEEE Std C37.106-2003, penurunan ataupun kenaikan yang terjadi masih diperkenankan.

4.4 Rekapitulasi Data

4.4.1 Rekapitulasi Beban *Load Shedding*

Tabel 4.2. Rekapitulasi Kuantitas Beban *Load Shedding* Tahap 1

Kasus	Load Shedding	Beban (%)	MW
1-5A+1-6 OFF+LS1	Load Shedding 1	10	6,312
2-1 + 2-2 OFF+LS 1	Load Shedding 1	10	6,312
1-6 + 2-1 OFF+LS 1	Load Shedding 1	10	6,312

Tabel 4.3. Rekapitulasi Kuantitas Beban *Load Shedding* Tahap 2

Kasus	Load Shedding	Beban (%)	MW
1-5A+New 1 OFF+LS2	Load Shedding 2	15	8,572
2-1 +New 2 OFF+LS 2	Load Shedding 2	15	8,572

Tabel 4.4. Rekapitulasi Kuantitas Beban *Load Shedding* Tahap 3

Kasus	Load Shedding	Beban (%)	MW
New 1 +New 2 OFF+LS 3	Load Shedding 3	25	15,226

4.4.2 Rekapitulasi Kondisi Frekuensi dan Tegangan Generator *Outage*

Tabel 4.5. Rekapitulasi Frekuensi dan Tegangan Generator *Outage*

Kasus	f min (%)	f steady state (%)	ID Bus	V min (%)	V steady state (%)	Kondisi	
						f	V
1-5A OFF	99,39%	99,59%	2AL-B	98,09	99,95	√	√
			3HT	96,04	98,28		√
			W2	97,58	99,64		√
2-1 OFF	98,98%	99,29%	1AL-B	91,96	95,88	√	√
			3HT	96,77	100,01		√
			W2	96,14	99,64		√

Tabel 4.5. Rekapitulasi Frekuensi dan Tegangan Generator *Outage* (lanjutan)

Kasus	f min (%)	f steady state (%)	ID Bus	V min (%)	V steady state (%)	Kondisi	
						F	V
1-5A + 1-6 OFF	98,73	99,10%	2AL-B	95,98	99,94	X	√
			3HT	93,47	98,08		√
			W2	94,96	99,38		√
1-5A + 1-6 OFF LS 1	98,75%	99,69%	2AL-B	95,96	99,92	√	√
			3HT	93,47	98,08		√
			W2	94,98	99,36		√
2-1 + 2-2 OFF	NOT STABLE	NOT STABLE	1AL-B	87,63	95,72	X	√
			3HT	92,72	99,93		√
			W2	92,3	99,38		√
2-1 + 2-2 OFF LS 1	98,49%	99,29%	1AL-B	87,63	96	√	√
			3HT	92,81	100,02		√
			W2	92,29	99,48		√
1-6 + 2-1 OFF	98,26%	99,74%	1AL-B	89,02	95,74	X	√
			1HT	92,86	99,95		√
			W2	92,69	99,39		√
1-6 + 2-1 OFF LS 1	98,50%	99,39%	1AL-B	87,95	96,03	√	√
			1HT	92,88	100,01		√
			W2	92,69	99,52		√
New 1 + 1-5A OFF	NOT STABLE	NOT STABLE	2AL-B	72,66	78,25	X	X
			3HT	77,98	83,63		X
			W2	75,01	80,82		X
			Bus63	76,12	81,92		X

Tabel 4.5. Rekapitulasi Frekuensi dan Tegangan Generator *Outage* (lanjutan)

Kasus	f min (%)	f steady state (%)	ID Bus	V min (%)	V steady state (%)	Kondisi	
						F	V
New 1 + 1-5A OFF LS 1	NOT STABLE	NOT STABLE	2AL-B	91,28	99,94	X	√
			3HT	87,3	99,06		√
			W2	87,82	99,9		√
			Bus63	88,53	99,73		√
New 1 + 1-5A OFF LS 2	97,81%	99,63%	2AL-B	91,3	99,98	√	√
			3HT	87,31	99,62		√
			W2	88,54	99,86		√
			Bus63	87,83	99,94		√
New 2 + 2-1 OF	NOT STABLE	NOT STABLE	1AL-B	72,66	78,25	X	X
			3HT	77,99	83,63		X
			W2	75,01	80,82		X
			Bus63	76,12	81,92		X
New 2 + 2-1 OFF LS1	NOT STABLE	NOT STABLE	1AL-B	80,15	89,14	X	X
			3HT	85,08	96,57		√
			W2	84,12	93,59		√
			Bus63	84,53	94,37		√
New 2 + 2-1 OFF LS2	97,70%	99,22%	1AL-B	80,65	96,28	√	√
			3HT	85,63	100,07		√
			W2	84,63	99,9		√
			Bus63	84,59	99,92		√

Tabel 4.5. Rekapitulasi Frekuensi dan Tegangan Generator *Outage* (lanjutan)

Kasus	f min (%)	f steady state (%)	ID Bus	V min (%)	V steady state (%)	Kondisi	
						f	V
New 2 + New 1 OFF	NOT STABLE	NOT STABLE	1AL-B	75,02	77,51	X	X
			3HT	77,52	79,67		X
			W2	72,34	74,34		X
			Bus63	75,14	77,22		X
New 2 + New 1 LS1	NOT STABLE	NOT STABLE	1AL-B	75,93	81,74	X	X
			3HT	79,74	84,86		X
			W2	74,04	79,04		X
			Bus63	76,91	82,09		X
New 2 + New 1 LS2	NOT STABLE	NOT STABLE	1AL-B	75,93	81,74	√	√
			3HT	79,74	84,86		√
			W2	74,04	79,03		X
			Bus63	76,91	82,09		X
New 2 + New 1 LS3	97,72%	100,27%	1AL-B	84,32%	99,86%	√	√
			3HT	83,98%	99,56%		√
			W2	82,97%	97,27%		√
			Bus63	78,01%	93,83%		√

4.4.3 Rekapitulasi Kondisi Frekuensi dan Tegangan *Short Circuit*

Tabel 4.6. Rekapitulasi Frekuensi dan Tegangan *Short Circuit*

Kasus	f min (%)	f steady state (%)	ID Bus	V min (%)	V steady state (%)	Kondisi	
						f	V
SC 0,38 KV	99,72%	100,04%	1AL-B	93,12	99,98	√	√
			2AL-B	93,33	99,99		√
			3HT	91,94	100,00		√
			W2	90,71	99,98		√
			SS69MB	93,29	99,94		√
SC 6,6 KV	100,78%	101,29%	2AL-B	45,84	99,98	√	√
			3HT	71,85	99,98		√
			W2	65,79	100,00		√
			SS69MA	75,63	98,91		√
SC 11 KV	100,78%	101,29%	2AL-B	45,84	99,98	√	√
			3HT	71,85	99,98		√
			W2	65,79	100,00		√
			SS69MA	75,63	98,91		√
SC 33 KV	101,63%	99,99%	2AL-B	31,77	99,97	√	√
			3HT	15,45	99,83		√
			SS69MA	29,34	98,95		√

4.4.4 Rekapitulasi Kondisi Frekuensi dan Tegangan *Motor Starting*

Tabel 4.7. Rekapitulasi Frekuensi dan Tegangan *Motor Starting*

Kasus	f min (%)	f steady state (%)	ID Bus	V min (%)	V steady state (%)	Kondisi	
						f	V
MOTOR GM-3-01 C START	100,00%	100,00%	2AL-B	99,98	99,98	√	√
			3HT	99,98	99,98		√
			W2	99,98	99,98		√
			SS61MB	99,80	99,80		√



[Halaman Ini Sengaja Dikosongkan]

BAB 5 PENUTUP

5.1 Kesimpulan


Berdasarkan hasil yang diperoleh dari simulasi dan analisis pada tugas akhir ini, dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut:

- a) Dari 8 kasus lepasnya pembangkit sebelum dilakukan mekanisme *load shedding* dapat menyebabkan kondisi sistem kelistrikan yang berbahaya, yaitu 1 kasus menyebabkan *underfrequency* dan 7 kasus lainnya menyebabkan terjadi *underfrequency* dan *undervoltage*.
- b) Dari 3 Kasus lepasnya 2 unit pembangkit yang melibatkan lepasnya generator STG New, Perlu diperhatikan nilai tegangan minimum pada beberapa bus karena kurang dari 90% tegangan normal sistem.
- c) Dari 4 kasus hubung singkat didapatkan bahwa kasus SC 6,6 kV, SC 11kV, dan SC 33 kV belum memenuhi standar *voltage sag* karena magnitude tegangan dibawah 10% selama 0,19s untuk SC 6,6 kV, 0,34s untuk SC 11 kV, dan 0,56s untuk SC 33 kV. Namun respon tegangan, frekuensi, dan sudut rotor tetap stabil dan masih dalam batas standar yang diizinkan sehingga sistem masih aman.
- d) PT. Pertamina RU V Balikpapan sangat handal dalam hal *starting* motor. Penyalaan motor 1890 kW secara *direct online* saat 8 generator *ON* masih diizinkan karena tegangan dan frekuensi hanya mengalami penurunan yang sangat kecil serta sudut rotor mengalami sedikit osilasi namun masih dalam batas standar aman.

5.2 Saran


Saran yang dapat diberikan untuk memperbaiki sistem setelah melakukan anlisis adalah sebagai berikut :

- a) Pada kasus lepasnya dua pembangkit yang lama membutuhkan *load shedding* tahap pertama sekitar 6,312 MW, sedangkan dua pembangkit yang melibatkan salah satu pembangkit baru membutuhkan *load shedding* tahap kedua sekitar 8,572 MW dan untuk kasus lepasnya dua pembangkit baru membutuhkan *load shedding* tahap ketiga sekitar 15,226 MW.

- 
- b) Sebaiknya dalam perancangan pelepasan beban, beban-beban yang dilepas harus di dekat generator yang mengalami kasus *outage*/lepas.
 - c) Untuk beberapa kasus lepasnya unit pembangkit yang mengakibatkan nilai tegangan bus mengalami penurunan hingga kurang dari 80%, perlu dilakukan *setting* rele pengaman (*undervoltage relay*) dengan delay waktu minimal sebesar total durasi waktu saat tegangan bus kurang dari 80% pada saat terjadi gangguan .
 - d) Untuk kasus hubung singkat SC 6,6 kV, SC 11kV, dan SC 33 kV , saran kedepannya, nilai dari kedip tegangan (*voltage sag*) lebih diperhatikan agar tidak mempengaruhi kerja dari peralatan-peralatan elektronik atau peralatan control dalam pabrik/industri.
 - e) Untuk kasus hubung singkat 6,6Kv, 11kV, dan 33 kV, perlu dilakukan *setting* rele pengaman (*undervoltage relay*) dengan delay waktu minimal sebesar total durasi waktu saat tegangan bus kurang dari 80% pada saat terjadi gangguan .

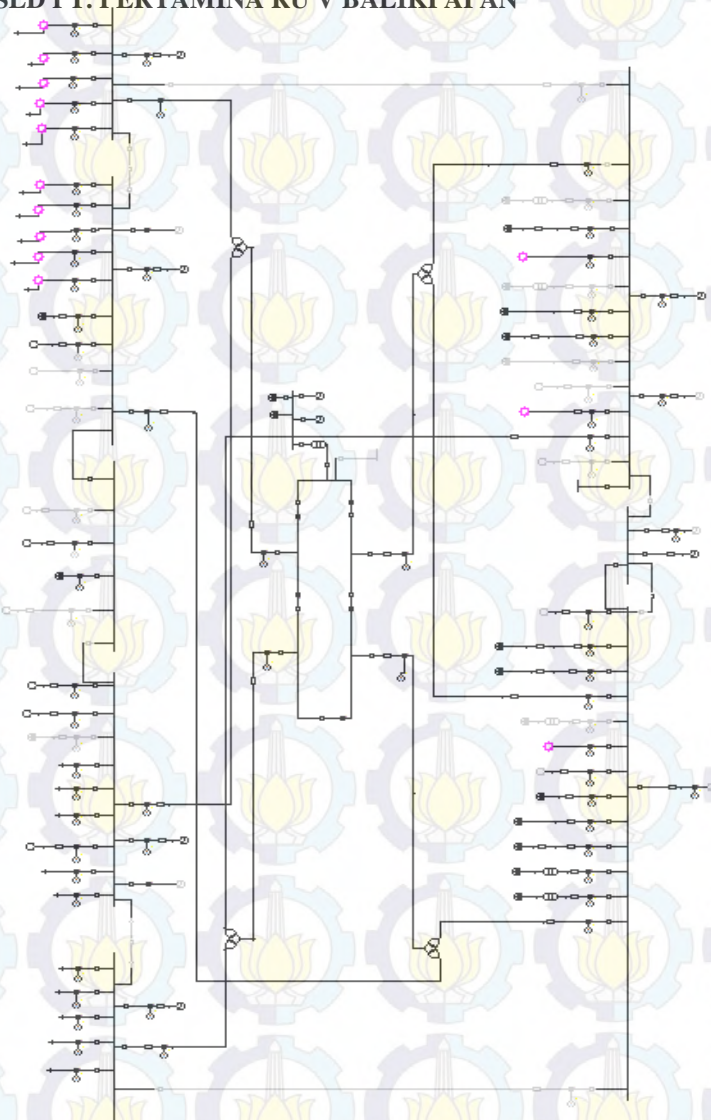
DAFTAR PUSTAKA

- [1] IEEE, “*Guide for Abnormal Frequency Protection for Power Generating Plants*”, 1987. IEEE Std C37.106-2003 (Revision of ANSI/IEEE C37.106-1987).
- [2] Das, J.C., “*Transient in Electrical Systems, Analysis ,Recognition, and Mitigation*” , McGraw-Hill Companies Inc, Ch. 12, 2010.
- [3] IEEE, “*Guide for Abnormal Frequency Protection for Power Generating Plants*”, 1987. IEEE Std C37.106-1987.
- [4] IEEE/CIGRE Joint Task Force on Stability Terms and Definitions, “*Definition and Classification of Power System Stability*”, IEEE Transactions on Power System , Vol. 19, No. 2, May 2004.
- [5] IEEE, “*Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality*”, 1995. IEEE Std 1159-1995.
- [6] Stevenson, W.D., John J. Granger, “*Elements of Power System Analysis, 4th Edition*”. McGraw-Hill Companies Inc, 1994.
- [7] Grigby, Leonard., “ *Power System Stability and Control*, 3rd edition” CRC Press, Taylor and Francis Group, 2012.
- [8] Penansang, Ontoseno. “ Diktat Kuliah Analisis Sistem Tenaga Listrik 2”, Jurusan Teknik Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, Surabaya.
- [9] Prahadi, Chafid , “Analisis Stabilitas Transien dan Mekanisme Pelepasan Beban pada PT. Pertamina Refinery Unit V Balikpapan”, 2014.
- [10] Arwisi P., Revan, “Studi Koordinasi Proteksi Rele Arus Lebih dan Rele Groundfault pada PT PERTAMINA RU V Balikpapan Akibat Penambahan Beban 25MW dan Generator 2x15 MW”, 2014.
- [11] Rakhmadian, Hilman, “Analisis Stabilitas Transien dan Mekanisme Pelepasan Beban di PT. Pupuk Kalimantan Timur Pabrik 5(PKT-5)”, 2013.

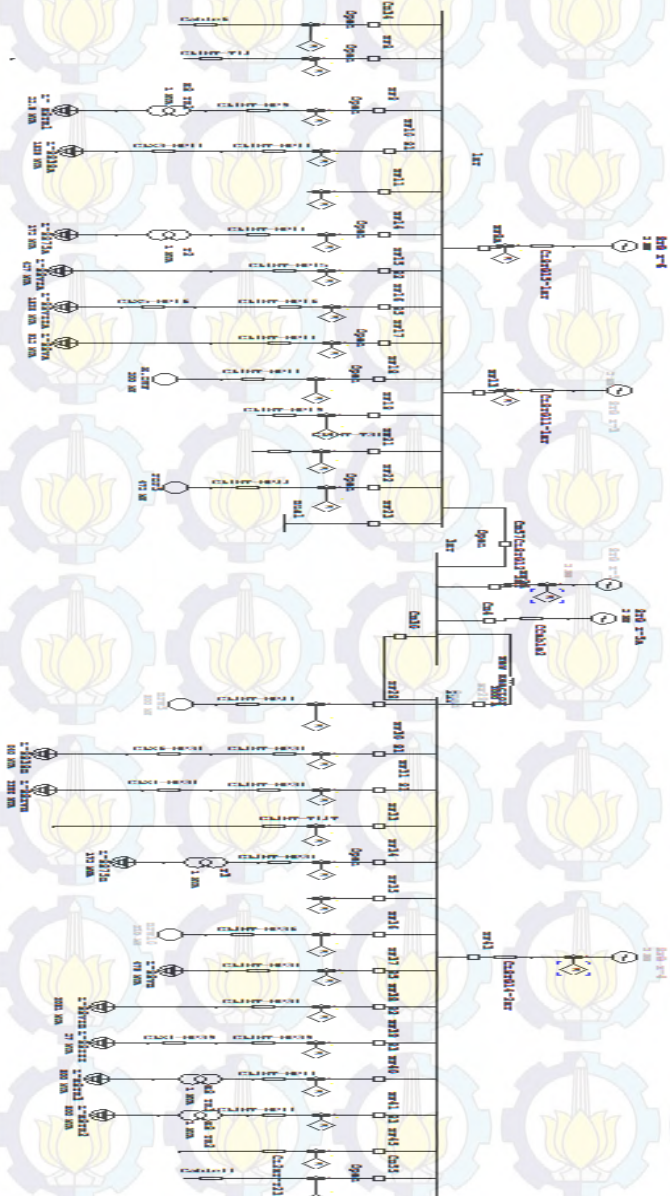


[Halaman Ini Sengaja Dikosongkan]

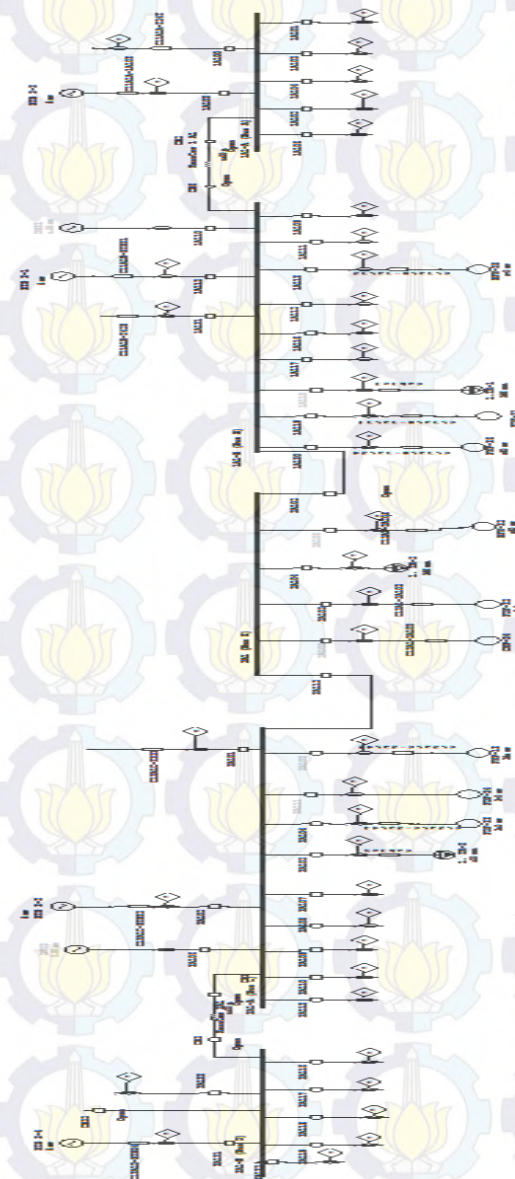
LAMPIRAN SLD PT. PERTAMINA RU V BALIKPAPAN



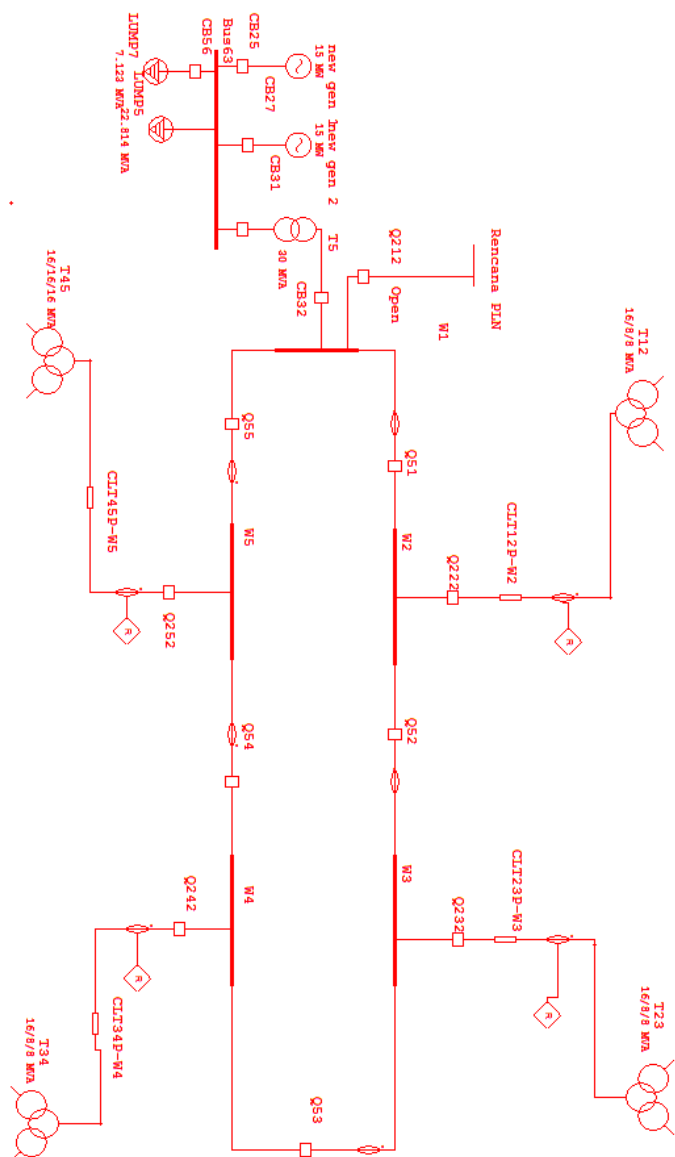
SLD POWER PLANT 1



SLD POWER PLANT 2



SLD PLANT TAMBAHAN BEBAN DAN GENERATOR



REKAPITULASI URUTAN PELEPASAN BEBAN

<i>Load Shedding 1</i>		
NO	LOAD	Normal Operation (kW)
1	SS-38A	1565
2	SS-38B	577
3	SS-IV	1032
4	GM 8-04A	350
5	GM 3-06B	312
6	SS-80A	723
7	SS-80B	1528
8	GM 4-01B	225
TOTAL		6312
<i>Load Shedding 2</i>		
1	SS-III	48
2	KM 4-01A	237
3	TR-65 C	154
4	TR-65D	224
5	GM 4-04B	284
6	GM 5-01A	207
7	KM 4-01B	229
8	TR-2	20
9	TR-67A	28
10	GM 20-09A	34
11	GM 20-22A	68
12	GM 20-17A	37
13	GM 20-08A	51
14	GM 20-04A	40
15	TR-67B	154
16	TR-68B	58
17	GM 20-04B	132

18	GM 20-08B	125
19	GM 20-17B	117
20	GM 20-09B	20
21	GM 20-22B	136
22	SS-VIA	97
23	SS-VIB	1792
24	SS-69A	314
25	SS-71A	105
26	SS-69B	13
27	LUMP4	907
28	MC63LB	631
29	MC63LD	570
30	MC62LA	580
31	MC62LC	580
32	MC62LE	580
TOTAL		8572
<i>Load Shedding 3</i>		
1	GM 4-04B	284
2	GM 5-01A	207
3	GM 8-05C	155
4	KM 8-01C	835
5	KM 35-101B	218
6	SS-VB	407
7	TR-61A	136
8	TR-61C	128
9	TR-61E	128
10	TR-62B	153
11	KM 35-02C	264
12	TR-74A	154

13	TR-74B	224
14	GM 15-01A	234
15	L-HSTR3	237
16	LUMP2	122
17	GM-4-01B	255
18	MC-74LA	154
19	MC-65LB	223
20	MC-65LA	154
21	MC-74LB	224
23	GM-31-39C	452
25	GM-2-01B	442
26	GM-2-02A	237
27	GM-32-22A	719
28	GM-33-01B	933
29	GM-32-05A	1547
30	Lump 6	6000
TOTAL		15226

PARAMETER GOVERNOR DAN EXCITER STG 1-5A

Exciter

6.6 kV	5 MW	Voltage Control
<input checked="" type="radio"/> Built-in	<input type="radio"/> UDM	
Type	Control Bus	
SR8F	Bus4	
VRmax	VRmin	
3.6	0	
KA	KF	
1000	0.13	
TA	TB	TF1
0.09	1.13	0.42
	TF2	TR
	0.16	0.1

Governor

6.6 kV	5 MW	Voltage Control
<input checked="" type="radio"/> Built-in	<input type="radio"/> UDM	
Type	Mode	LS GP#
2301	Droop	None
Droop	Pmax	Pmin
5	5.263	0
	thetaMax	thetaMin
	42	0
alpha	beta	rho
0.8273	0.165	0.2
	K1	
	271.6	
tau	T1	T2
0.1	0.025	0.01

STG 1-6

Exciter

6.6 kV	5 MW	Voltage Control		
<input checked="" type="radio"/> Built-in	<input type="radio"/> UDM			
Type	Control Bus			
SR8F	Bus20			
VRmax	VRmin			
3.6	0			
KA	KF			
1000	0.13			
TA	TB	TF1	TF2	TR
0.09	1.13	0.42	0.16	0.1

Governor

6.6 kV	5 MW	Voltage Control		
<input checked="" type="radio"/> Built-in	<input type="radio"/> UDM			
Type	Mode	LS GP#		
2301	Droop	None		
Droop	Pmax	Pmin	thetaMax	thetaMin
5	5.263	0	42	0
alpha	beta	rho	K1	
0.8273	0.165	0.2	271.6	
tau	T1	T2		
0.1	0.025	0.01		

STG 2-1

Exciter

6.6 kV	8 MW	Voltage Control		
<input checked="" type="radio"/> Built-in <input type="radio"/> UDM				
Type		Control Bus		
SR8F		Bus8		
VRmax	VRmin			
3.6	0			
KA	KF			
1000	0.13			
TA	TB	TF1	TF2	TR
0.09	1.13	0.42	0.16	0.1

Governor

6.6 kV	8 MW	Voltage Control		
<input checked="" type="radio"/> Built-in <input type="radio"/> UDM				
Type	Mode	LS GP#		
2301	Droop	None		
Droop	Pmax	Pmin	thetaMax	thetaMin
5	8.421	0	42	0
alpha	beta	rho	K1	
0.8273	0.165	0.2	271.6	
tau	T1	T2		
0.1	0.025	0.01		

STG 2-2

Exciter

6.6 kV 8 MW Swing				
<input checked="" type="radio"/> Built-in		<input type="radio"/> UDM		
Type		Control Bus		
SR8F		Bus5		
VRmax	VRmin			
3.6	0			
KA	KF			
1000	0.13			
TA	TB	TF1	TF2	TR
0.09	1.13	0.42	0.16	0.1

Governor

6.6 kV 8 MW Swing				
<input checked="" type="radio"/> Built-in		<input type="radio"/> UDM		
Type		Mode	LS GP#	
2301		Droop	None	
Droop	Pmax	Pmin	thetaMax	thetaMin
5	8.421	0	42	0
alpha	beta	rho	K1	
0.8273	0.165	0.2	271.6	
tau	T1	T2		
0.1	0.025	0.01		

STG 2-3

Exciter

6.6 kV	8 MW	Swing
--------	------	-------

☒ Built-in ☐ UDM

Type Control Bus

SR8F Bus39

VRmax VRmin

3.6 0

KA KF

1000 0.13

TA TB TF1 TF2 TR

0.09 1.13 0.42 0.16 0.1

Governor

6.6 kV	8 MW	Swing
--------	------	-------

☒ Built-in ☐ UDM

Type Mode LS GP#

2301 Droop None

Droop Pmax Pmin thetaMax thetaMin

5 8.421 0 42 0

alpha beta rho K1

0.8273 0.165 0.2 271.6

tau T1 T2

0.1 0.025 0.01

STG 2-4

Exciter

6.6 kV	8 MW	Swing		
<input checked="" type="radio"/> Built-in	<input type="radio"/> UDM			
Type	Control Bus			
SR8F	Bus45			
VRmax	VRmin			
3.6	0			
KA	KF			
1000	0.13			
TA	TB	TF1	TF2	TR
0.09	1.13	0.42	0.16	0.1

Governor

6.6 kV	8 MW	Swing		
<input checked="" type="radio"/> Built-in	<input type="radio"/> UDM			
Type	Mode	LS GP#		
2301	Droop	None		
Droop	Pmax	Pmin	thetaMax	thetaMin
5	8.421	0	42	0
alpha	beta	rho	K1	
0.8273	0.165	0.2	271.6	
tau	T1	T2		
0.1	0.025	0.01		

STG New 1

Exciter

11 kV 15 MW Swing				
<input checked="" type="radio"/> Built-in		<input type="radio"/> UDM		
Type		Control Bus		
SR8F		Bus63		
VRmax	VRmin			
3.6	0			
KA	KF			
1000	0.13			
TA	TB	TF1	TF2	TR
0.09	1.13	0.42	0.16	0.1

Governor

11 kV 15 MW Swing				
<input checked="" type="radio"/> Built-in		<input type="radio"/> UDM		
Type	Mode	LS GP#		
2301	Droop	None		
Droop	Pmax	Pmin	thetaMax	thetaMin
5	21.053	0	42	0
alpha	beta	rho	K1	
0.8273	0.165	0.2	271.6	
tau	T1	T2		
0.1	0.025	0.01		

STG New 2

Exciter

11 kV		15 MW		Swing	
<input checked="" type="radio"/> Built-in		<input type="radio"/> UDM			
Type		Control Bus			
SR8F		Bus63			
VRmax	VRmin				
3.6	0				
KA	KF				
1000	0.13				

TA	TB	TF1	TF2	TR
0.09	1.13	0.42	0.16	0.1

Governor

11 kV		15 MW		Swing	
<input checked="" type="radio"/> Built-in		<input type="radio"/> UDM			
Type		Mode		LS GP#	
2301		Droop		None	
Droop	Pmax	Pmin	thetaMax	thetaMin	
5	21.053	0	42	0	
alpha	beta	rho	K1		
0.8273	0.165	0.2	271.6		

tau	T1	T2
0.1	0.025	0.01

[Halaman Ini Sengaja Dikosongkan]

BIOGRAFI PENULIS



Yudiestira atau sering dipanggil Yudis, lahir di Jakarta 21 tahun yang lalu. Tepatnya pada tanggal 7 Juli 1994. Penulis adalah anak ke-2 dari 2 bersaudara dan selama ini tinggal di Kota Pahlawan Surabaya. Penulis memulai jenjang pendidikan dasar di SD Negeri 18 Jakarta. Setelah 6 tahun belajar di sana, ia melanjutkan pendidikannya ke jenjang menengah tepatnya di SMP Negeri 75 Jakarta. 3 tahun kemudian, pendidikan jenjang menengah dilanjutkan ke SMA Negeri Unggulan Mohammad Husni Thamrin Jakarta. Dan akhirnya dapat lulus seleksi dan dapat melanjutkan pendidikan ke jenjang perguruan tinggi di jurusan Teknik Elektro ITS dan mengambil bidang studi Teknik Sistem Tenaga. Penulis dapat dihubungi melalui email yudiestira_2012@yahoo.com.



(Halaman Ini Sengaja Dikosongkan)